

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

**Měření součinitele místních ztrát různých ventilů na
vzduchové trati**

**Measurement of the Local Losses Coefficient for Various
Valves on the Air Line**

Student:

Jan Bosák

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Marian Bojko, Ph.D.

Ostrava 2011

Zadání bakalářské práce

Student:

Jan Bosák

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Studijní obor:

2302R007 Hydraulické a pneumatické stroje a zařízení

Téma:

Měření součinitele místních ztrát různých ventilů na vzduchové trati
Measurement of the Local Losses Coefficient for Various Valves on the
Air Line

Zásady pro vypracování:

Navrhnete měřicí trať ke stanovení součinitele místních ztrát různých ventilů na vzduchové trati.

1. Vypracujte teorii místních ztrát při proudění skutečné kapaliny.
2. Pro měření tlaku a průtoku při proudění vzduchu zpracujte charakteristika měřících zařízení k měření tlaku a průtoku vzduchu.
3. Navrhnete experimentální měřicí trať k měření charakteristiky ventilů při proudění vzduchu včetně umístění měřidel a vyhodnocení měřených veličin.
4. Proved'te měření na vzduchové trati pro jednotlivé ventily.
5. Vyhodnoťte výsledky měření místních ztrát formou tabulek a grafů.

Seznam doporučené odborné literatury:

1. MIKAN, J. *Měření plynů*. Říčany u Prahy: GAS s.r.o., 2003. 386 s. ISBN 80-7328-053-1.
2. JANALÍK, J. *Měření tekutinových mechanismů*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 1995. 155 s.
3. JENČÍK, J.; KUHN, L. *Technická měření ve strojírenství*. Praha: SNTL Praha, 1982. 580 s.
4. NOSKIEVIČ, J. *Mechanika tekutin*. Praha: SNTL Praha, 1987. 354 s.
5. NOSKIEVIČ, J.; JANALÍK, J.; RÝC, Z.; ŠTÁVA, P. *Mechanika tekutin. Příručka pro laboratorní cvičení*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 1987. 152 s. ISBN 80-03-00308-3.
6. VINOPAL, S.; KOLÁŘ, V. *Hydraulika průmyslových armatur*. Praha: SNTL Praha, 1963. 650 s.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Marian Bojko, Ph.D.**

Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011

Kozubková

prof. RNDr. Milada Kozubková, CSc.
vedoucí katedry



Farana

prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě.....23.5.2011.....

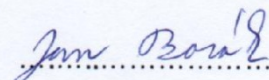
.....Jan Bosa'18.....

podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB – TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB – TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB – TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́доміі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), v znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 23.5.2011


.....
podpis

Jan Bosák

Nádražní 233

784 01, Červenka

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Marianu Bojkovi, Ph.D. za velmi ochotnou pomoc a cenné rady při psaní mé bakalářské práce.

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

BOSÁK, J. *Měření součinitele místních ztrát různých ventilů na vzduchové trati: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2011, 53 s. Vedoucí práce: Bojko, M.

Tato bakalářská práce se zabývá měřením součinitele místních ztrát různých ventilů na vzduchové trati. V úvodu je definována problematika určování místních ztrát a způsoby měření tlaku a průtoku. Na základě potřeb daného měření byly navrženy experimentální tratě, na kterých následně probíhalo samotné měření. Měření byly kovový ventil, plastový ventil a plastový kohout a to vždy v několika pozicích. Měření bylo realizováno na trati s kolenovým průtokoměrem a na trati s průtokem měřeným digitálním průtokoměrem. Výsledky obou přístupů měření průtoku jsou vyhodnocené pomocí tabulek a grafických závislostí. V závěru jsou oba přístupy měření průtoku navzájem porovnány.

KLÍČOVÁ SLOVA:

Součinitel místních ztrát, Kovový ventil, Plastový ventil, Plastový kohout, Průtok, Tlaková ztráta, Reynoldsovo číslo, Experimentální měřicí trať

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

BOSÁK, J. *Measurement of the Local Losses Coefficient for Various Valves on the Air Line*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Hydromechanics and Hydraulic Equipment, 2011, 53 s. Thesis head: Bojko, M.

This thesis deals with measuring of the local losses coefficient for various valves on the air line. In the introduction there are definitions of issues of the determinations of local losses and ways of pressure measuring and flow measuring. Based on the needs of the given measurement the experimental lines were proposed on which subsequently actual measurements took place. Metal valve, plastic valve and plastic ball valve, were measured always in various positions. Measurement was carried out on the track with the knee flowmeter and on the track with the digital flowmeter. The results of both approaches to the measuring are evaluated using tables and graphics dependencies. In the end, both approaches are compared to each other.

KEY WORD:

Coefficient of local losses, Metal valve, Plastic valve, Plastic ball valve, Flow, Pressure loss, Reynolds number, Experimental measurement line

Obsah

	strana
Seznam použitých označení.....	9
1 Teorie místních ztrát.....	11
1.1 Tlakové ztráty při proudění skutečných tekutin	11
1.2 Ztráty místní při proudění skutečných tekutin	12
2 Charakteristika měření tlaku	14
2.1 Měřidla tlaku (absolutního, diferenčního, relativního, atmosférického).....	15
2.1.1 Deformační tlakoměry	16
2.1.2 Kapalinové tlakoměry	18
2.1.3 Převodníky tlaku	19
2.1.4 Číslicové (digitální) tlakoměry.....	20
2.1.5 Další druhy měřidel tlaku	20
3 Měření průtoku a rychlosti proudění skutečných tekutin	21
3.1 Metody měření průtoku	21
3.1.1 Objemová metoda měření průtoku	21
3.1.2 Rychlostní metoda měření průtoku	21
3.2 Měřidla průtoku a rychlosti	22
3.2.1 Průřezová měřidla - clona	22
3.2.2 Kolenové průtokoměry	24
3.2.3 Další měřidla	24
4 Návrh experimentální měřicí tratě	25
4.1 Způsoby měření průtoku vzduchu	25
4.2 Způsob měření tlakových ztrát na měřícím prvku	25
4.3 Měřené prvky k stanovení součinitele místních ztrát	25
4.4 Navržené měřicí tratě	26
4.4.1 Měření digitálním průtokoměrem.....	26
4.4.2 Měření kolenovým průtokoměrem	28
5 Specifikace prvků a měřidel	29
6 Postup měření na experimentálních tratích	32
7 Vyhodnocení měření	33

7.1	Vyhodnocení součinitele místních ztrát a Reynoldsova čísla pro hodnoty naměřené kolenovým průtokoměrem.....	33
7.2	Výpočet součinitele místních ztrát a Reynoldsova čísla pro hodnoty naměřené digitálním průtokoměrem	39
7.3	Porovnání výsledků měření průtoku	45
8	Závěr.....	50
9	Seznam použité literatury.....	52
10	Seznam příloh	53

Seznam použitých označení

Označení	Význam	Jednotka
F	síla	N
Q_m	hmotnostní průtok	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
Q_v	objemový průtok	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Q_{v-k}	objemový průtok kolenovým průtokoměrem	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Q_{v-p}	objemový průtok digitálním průtokoměrem	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Re	Reynoldsovo číslo	1
S	plocha	m^2
V	objem	m^3
d	průměr	m
d_k	vnitřní průměr kolena	m
e_z	měrná ztrátová energie	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
e_{zm}	měrná ztrátová energie místní	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
e_{zt}	měrná ztrátová energie po délce	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
g	tíhové zrychlení	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
h	výška	m
l	délka	m
m	hmotnost	kg
p	tlak	Pa
p_1, p_2	tlak před a za prvkem	Pa
p_3, p_4	tlak z vnitřní a vnější strany kolena	Pa
Δp_1	tlakový spád prvku	Pa

Δp_2	tlakový spád kolena	Pa
Δp	tlaková difference	Pa
r_s	střední poloměr zakřivení kolena	m
v	rychlost proudění	$m \cdot s^{-1}$
v_s	střední rychlost proudění	$m \cdot s^{-1}$
$v_{s,k}$	střední rychlost proudění v koleni	$m \cdot s^{-1}$
$v_{s,p}$	střední rychlost proudění v dig. průtokoměru	$m \cdot s^{-1}$
η	dynamická viskozita	$Pa \cdot s$
λ	součinitel tření	1
ν	kinematická viskozita	$m^2 \cdot s^{-1}$
ρ	hustota	$kg \cdot m^{-3}$
ξ	součinitel místních ztrát	1

1 Teorie místních ztrát

1.1 Tlakové ztráty při proudění skutečných tekutin

Prouděním reálné kapaliny v systému dochází k úbytkům mechanické energie vířením a třením. Tyto ztráty můžeme popsat jako tlakové rozdíly neboli tlakovou ztrátu. Tlakové ztráty vznikají prouděním tekutin v přímých potrubích a dále pak v místních odporech [1]. Jako místní odpory si můžeme představit kterýkoliv prvek, v němž dochází k náhlé změně průřezu průtočné plochy nebo změně směru, dále pak různé armatury a tvarové prvky.

Základní rovnicí, z níž můžeme při popisu ztrát vycházet, je rovnice Bernoulliho:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_{s1}^2}{2} + g \cdot h_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_{s2}^2}{2} + g \cdot h_2 + e_z \quad (1.1)$$

kde levá strana rovnice s indexy 1 označuje vstupní parametry měřeného úseku a pravá strana s indexací 2 označuje výstupní parametry. Dále pak ρ označuje hustotu tekutiny, v střední rychlost proudění, p tlak, g tíhové zrychlení, h výšky jednotlivých průřezů a e_z celkovou ztrátovou energii mezi vstupem a výstupem.

Ztráty třením po délce v přímém potrubí jsou charakterizovány součinitelem tření λ a výpočtem měrné ztrátové energie.

$$e_{zt} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2} \quad [J \cdot kg^{-1}] \quad (1.2)$$

Ztráty místní jsou definovány součinitelem místních ztrát ξ a měrnou ztrátovou energií:

$$e_{zm} = \xi \cdot \frac{v^2}{2} \quad [J \cdot kg^{-1}] \quad (1.3)$$

Ve výpočtu l označuje délku měřeného potrubí a d označuje jeho světlost. Rychlost v zjistíme ze vzorce pro objemový průtok, kde $Q_v = S \cdot v$ [$m^3 \cdot s^{-1}$]. Při zjišťování součinitelů λ a ξ vycházíme z rozdílu naměřených tlaků $\Delta p = p_1 - p_2$ a rovnice

$$\Delta p = e_z \cdot \rho \quad [Pa] \quad (1.4)$$

ze které dosazením do rovnice (1.2) získáme vztah pro výpočet součinitele tření λ

$$\lambda = \frac{2 \cdot \Delta p \cdot d}{\rho \cdot l \cdot v^2} \quad [-] \quad (1.5)$$

a dosazením (1.4) do rovnice (1.2) dostaneme vztah pro výpočet součinitele místních ztrát ξ

$$\xi = \frac{2 \cdot \Delta p}{\rho \cdot v^2} [-] \quad (1.6)$$

Součinitel tření λ je ovlivňován více faktory, jako jsou rychlost proudění kapaliny, hustota a viskozita, drsnosti potrubí, délkové rozměry systému. Souhrnně se dají tyto faktory vyjádřit Reynoldsovým číslem Re , které zahrnuje rychlost proudění tekutiny, závislost na hustotě a viskozitě a délkový rozměr. Pro kruhový průřez potrubí je Re vyjádřeno vztahem

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} [-] \quad (1.7)$$

kde ν je kinematická viskozita, která vyjadřuje vztah mezi ν a dynamickou viskozitou η

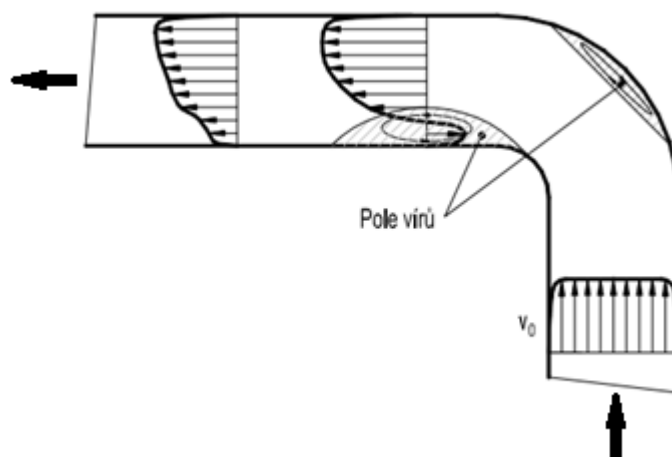
$$\nu = \frac{\eta}{\rho} [m^2 \cdot s^{-1}] \quad (1.8)$$

Kritická hodnota Reynoldsova čísla je 2320. Do této hodnoty se jedná o proudění laminární, které se vyznačuje tím, že po sobě jednotlivé vrstvičky tekutiny kloužou a k přenosu hybnosti ve směru kolmém na směr proudění dochází jen na molekulární úrovni. Součinitel tření λ je závislý pouze na Reynoldsově číslu. Nad hodnotou 2320 se laminární proudění začíná měnit v turbulentní. Od hodnoty Re větší jak 10^4 se jedná o plně rozvinuté turbulentní proudění, kde dochází k intenzivnímu přenosu hybnosti ve směru kolmém na směr proudění (tím i ke zvýšeným ztrátám energie) makroskopickými turbulentními víry. Intenzita tvorby vírů závisí na rychlosti proudění a také na překážkách měnící směr proudění, což mohou být místní odpory nebo nerovnosti stěn potrubí.

1.2 Ztráty místní při proudění skutečných tekutin

Místní ztráty nebo také tlakové ztráty vznikají při průtoku tekutiny takovými částmi potrubí, které přímo narušují průtok v přímém potrubí o konstantním průřezu (kohouty, ventily, filtry, aj.) nebo jen mění směr proudění tekutiny (rozbočení, kolena, oblouky, atd.) [2]. Součinitel místních ztrát ξ se určuje experimentálně pro každý konkrétní prvek v potrubním systému.

Tvarovky měnící směr proudění jako jsou kolena nebo oblouky, řadíme mezi základní potrubní prvky. Při průchodu tvarovkou vznikají vírová pole, která narušují rychlostní profil, jež je před vstupem do prvku rovnoměrný (obr. 1.1). Rychlostní profil je deformován v závislosti na geometrickém uspořádání prvku a po výstupu z prvku se opět snaží ustálit. Tato deformace přímo způsobuje místní tlakovou ztrátu.



Obr. 1.1 Rychlostní profily při proudění v kolení [2]

Další prvky používané v potrubních systémech mohou být ventily, kohouty, clony, zúžení, filtry, apod., které v závislosti na konstrukci a aktuální poloze ovlivňují směr proudění tekutiny, tvorbu vírových polí a následně tím deformují rychlostní profil. Což přímo ovlivňuje místní tlakovou ztrátu.

Postup stanovení součinitele místních ztrát ξ vychází z naměřeného rozdílu tlaku na vstupu (ozn. indexem 1) a na výstupu (ozn. indexem 2). Tento tlakový rozdíl se skládá z tlakových ztrát místních a z tlakové ztráty třením v potrubí.

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \Delta p_m + \Delta p_t \text{ [Pa]} \quad (1.9)$$

Místní tlaková ztráta má tvar

$$\Delta p_m = \xi \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho \text{ [Pa]} \quad (1.10)$$

Dosazením do rovnice rozdílu tlaků získáme součinitel místní ztráty

$$\xi = \frac{2 \cdot (\Delta p - \Delta p_t)}{\rho \cdot v^2} [-] \quad (1.11)$$

Celkový součinitel místní ztráty je ve výsledku složen z místní ztráty a ztráty třením v prvku:

$$\xi = \xi_t + \xi_m [-] \quad (1.12)$$

2 Charakteristika měření tlaku

Tlak patří mezi stavové veličiny, to znamená, že definuje změnu stavu plynu. Mezi tlakem a objemem platí vztah, že součin tlaku p a objemu V je při neměnné teplotě konstantní [3].

$$p \cdot V = konst. \quad (2.1)$$

Jestliže klesá tlak, narůstá objem a naopak.

Šíření tlaku v uzavřené nádobě popisuje Pascalův zákon. Ten říká, že tlak vyvolaný vnější silou v kapalině je ve všech místech stejný a šíří se všemi směry stejně.

Tlak je definován jako síla F působící kolmo na jednotku plochy S .

$$p = \frac{F}{S} = \frac{m \cdot g}{S} \quad [Pa] \quad (2.2)$$

Hydrostatický tlak je dán tlakem sloupce kapaliny o výšce h a hustotě ρ :

$$p = \rho \cdot g \cdot h \quad [Pa] \quad (2.3)$$

Běžně užívané pojmy jako jsou přetlak, podtlak, absolutní tlak a jiné si můžeme vysvětlit následovně:

Atmosférický tlak nebo také barometrický tlak je tvořen tíhou vzduchu kolem nás. Jeho hodnota se mění vlivem nadmořské výšky i vlivem aktuálního počasí. V praxi se běžně setkáváme s barometrickým tlakem za technických normálních podmínek, který má hodnotu $p_{bt} = 10^5 \text{ Pa}$ a nebo s barometrickým tlakem za fyzikálních podmínek $p_{bf} = 101325 \text{ Pa}$.

Přetlak a podtlak jsou hodnoty přímo vztažené k barometrickému tlaku. Podtlak určuje hodnotu pod barometrickým tlakem, přetlak někdy označován jako manometrický tlak naopak hodnotu nad barometrickým tlakem.

Absolutní tlak se měří od absolutní nuly neboli od absolutního vakua. Absolutní tlak vypočítáme sečtením barometrického tlaku a přetlaku případně podtlaku.

$$p_{abs} = p_b + p_p \quad [Pa] \quad (2.4)$$

Statický tlak je stejný v celém průřezu průtočné plochy. Dynamické působení proudící tekutiny neovlivňuje jeho velikost. Pokud umístíme měřidlo tlaku na obvod potrubí, je statický tlak roven přetlaku.

Dynamický tlak je rozdíl tlaků, který je nutný (dle Bernoulliho rovnice) ke zrychlení tekutiny z klidu do určité rychlosti. U nestlačitelných tekutin je dynamický tlak roven kinetickému.

$$p_{dyn} = p_k = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \text{ [Pa]} \quad (2.5)$$

V případě, že se jedná o stlačitelné tekutiny, zahrnujeme do výpočtu parametr stlačitelnosti kapaliny s . Dynamický tlak se potom vypočítá:

$$p_{dyn} = p_k \cdot s \text{ [Pa]} \quad (2.6)$$

Sonda pro měření dynamického tlaku musí být umístěna v ose proudění tekutiny. Pokud tekutina neproudí, je dynamický tlak roven statickému. S postupným narůstáním rychlosti proudění se začíná zvyšovat hodnota dynamického tlaku oproti statickému.

Tlaková difference je rozdíl dvou tlaků $\Delta p = (p_1 - p_2)$ [Pa] naměřených ve stejném čase na dvou různých místech, například měření na cloně (obr. 3.1).

2.1 Měřidla tlaku (absolutního, diferenčního, relativního, atmosférického)

Měření tlaků provádíme měřidly zvané tlakoměry [3]. Základní rozdělení tlakoměrů včetně měřeného rozsahu je uvedeno v tabulce (tab. 2.1).

Druhy tlakoměrů	Rozsah měření
Pístové: <ul style="list-style-type: none"> – klasické – digitální – tendenční (průmyslové) 	<ul style="list-style-type: none"> – 3 kPa až 2 GPa – 5 kPa až 25 MPa 0,1 až 5 MPa
Deformační: <ul style="list-style-type: none"> – trubicové (Bourdonské) – membránové – krabicové – vlnovcové 	<ul style="list-style-type: none"> do 200 MPa (až 2 GPa) do 3 MPa do 200 kPa do 500 kPa
Kapalinové: <ul style="list-style-type: none"> – U-trubicové – nádobkový – se šikmou trubicí – zvonové – prstencové 	<ul style="list-style-type: none"> do 20 kPa (náplň H₂O) do 250 kPa (náplň Hg) do 100 kPa (náplň H₂O) do 5 kPa (náplň H₂O) do 500 Pa do 25 kPa
Převodníky tlaku: <ul style="list-style-type: none"> – odporové – indukční – kapacitní – piezoelektrické – rezonanční – světlovodné 	<ul style="list-style-type: none"> do 50 MPa do 25 MPa do 40 MPa do 100 MPa do 50 MPa od 0,1 mPa do 1 MPa
Barometry:	od 80 do 115 kPa
Vakuometry:	do 10 μPa (10 ⁻⁵ Pa)

Tab. 2.1 Typy tlakoměrů a rozsahy měřidel tlaku [3]

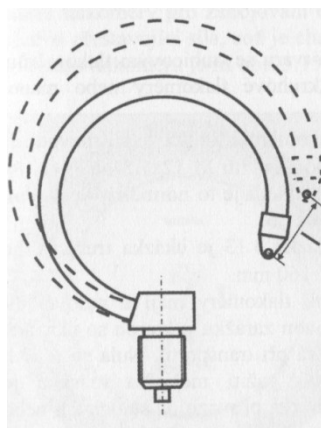
2.1.1 Deformační tlakoměry

Využívají pružné deformace, a tím i změny tvaru vhodných tlakoměrných prvků za působení měřeného tlaku. Vzniklé deformace se nesmí přiblížit mezi pružnosti, hrozil by tím vznik plastické deformace a trvalé poškození měřidla. Deformace tlakoměrného prvku se mechanicky převádí na ukazatel.

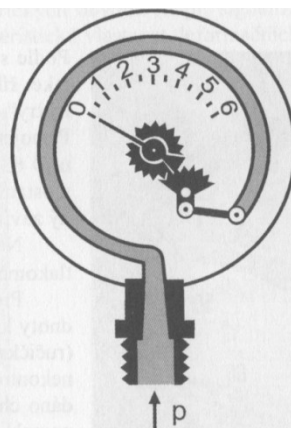
Trubicové tlakoměry

Prvek, který se deformuje, je v tomto případě tzv. Bourdonova trubice, jež je stočena do kruhového oblouku. Řez jejím profilem může mít tvar oválný, eliptický nebo jiný. Na jednom konci je trubice uzavřena. Druhý, otevřený konec trubice je upevněn k tělu měřidla a je napojen na zdroj měřeného tlaku. Při působení tlaku se vychýlí uzavřený konec a to vlivem napřímování trubice viz. obr. 2.1.

Vychýlení trubice je závislé na tlaku, rozměrech a úhlu stočení trubice. Úhel stočení se požívá od 180° do 450° , přičemž nejčastější je 270° a to díky optimální výchylce. Uzavřený konec trubice je napojen na převodový mechanismus, který je nejčastěji tvořen z pák a ozubených kol (obr. 2.2).



Obr. 2.1 Deformace trubicového tlakoměru kde l je délka výchylky [3]



Obr. 2.2 Vnitřní uspořádání trubicového tlakoměru [3]

Pokud je úhel stočení trubice 180° označujeme jej jako U tvar, 270° pak jako C tvar a pokud je stočení větší jak 360° jedná se potom o spirály nebo šroubovice. Pokud jde o tlakoměry pracující s tlaky v řádech GPa ty již používají přímé trubice. Trubice jsou především z kovových materiálů, kdy pro nízké tlaky jsou použity slitiny barevných kovů (bronz, aj.) a u vysokých tlaků dominuje legovaná ocel.

Trubicové tlakoměry se vyrábějí v normalizovaných rozměrech pouzder a to o vnějším průměru 63, 100, 160 a 250 mm. Závity pro našroubování tlakoměru do systému jsou také normalizovány. Trubicové tlakoměry se používají hlavně k měření přetlaků nebo podtlaků. Měření absolutních tlaků je s nimi také možné, ale vyžadují speciální úpravu.

Maximální teploty, při kterých je možné trubicové tlakoměry provozovat jsou v rozmezí - 30 až +60 °C. Přesnost v tomto rozmezí však není zaručena, protože teplotní roztažnost a modul pružnosti materiálu trubice ovlivňují mechanický převod. Garantované přesnosti lze dosáhnout pouze v rozmezí teplot +15 až +25 °C.

Třídy přesnosti běžně vyráběných trubicových tlakoměrů jsou 1; 1,6; 2,5; 4.

Membránové tlakoměry

Trubice je u nich nahrazena kruhovou membránou z pružného materiálu, která je uložena v komoře mezi přírubami. Membrána je nejčastěji kruhová, ale může být i z plastu nebo pryže. Ty však musí být vyztuženy ještě pružinou, aby bylo docíleno potřebné charakteristiky. Průhyb membrány se snímá pákovým a ozubeným mechanismem. Komora tlakoměru je klasicky umístěna pod ukazatelem. Díky snadnému čištění měřicího prostoru lze tyto přístroje použít i pro měření různých konzistentních látek.

Krabicové tlakoměry

Prvek, který se deformuje je v tomto případě dutý kotouč (krabice), do které se přivádí ze spodní části tlak. Horní část krabice se vlivem přetlaku nebo podtlaku deformuje směrem nahoru nebo dolů. Tento pohyb je snímán a převáděn na ukazatel. Jsou to nejcitlivější tlakoměry, jejichž citlivost lze ještě zvýšit zařazením více krabic za sebe. Používají se pro měření nižších tlaků.

Vlnovcové tlakoměry

Deformační prvek těchto tlakoměrů tvoří vlnovec, někdy též označovaný jako měch. Je to nádoba vyrobená válcováním, tenkostěnná bezešvá s vlnami na povrchu. Vlnovec je umístěn uvnitř pouzdra, do kterého je přiváděn tlak. Tlak tak působí z vnější strany na vlnovec. Pro větší tlaky může být vlnovec ze své vnitřní strany doplněn pružinou. Mechanicky se snímá změna výšky měchu a je převáděna na ukazatel. Tyto tlakoměry mají dobrou linearitu a jsou vhodné pro menší tlaky.

Výhody deformačních tlakoměrů:

- velký měřicí rozsah, relativně levné, odolné provedení, nezávislé na el. energii, jednoduché a spolehlivé v provozu, dostatečná přesnost, dostatečně velká přestavná síla umožňující použití přídavných zařízení, jednoduchá obsluha a údržba

Nevýhody deformačních tlakoměrů:

- hrozí vznik trvalé deformace, elastické dopružování (hystereze)

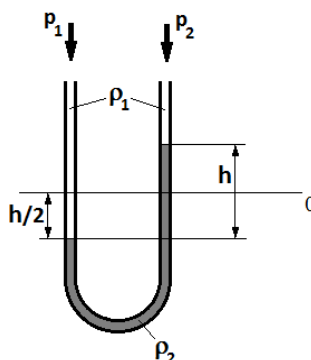
2.1.2 Kapalinové tlakoměry

Jsou to typy tlakoměrů s nejjednodušší konstrukcí. Jsou velmi přesná a vhodná pro měření malých a středních tlaků. Využívají se zejména pro laboratorní měření. Velikost tlaku se určuje z výšky kapalinového sloupce. Jako náplň pro určování tlaku se nejčastěji používá destilovaná voda, rtuť nebo olej. Tyto náplně bývají různě obarveny. Tlakoměry mohou být jednodukapalinové nebo dvoukapalinové (u nich musí být použity kapaliny o různé hustotě, které se vzájemně nesmísí)

Tlakoměry se liší podle ustavení trubic (svislé nebo šikmé) nebo může být jedna z trubic nahrazena nádobkou. Dvoutrubicový může mít dva přívody (otevřený tlakoměr) a sloužit tak k měření diferencí, přetlaků, podtlaků a nebo jen jeden přívod (uzavřený tlakoměr) s tím, že je druhý konec trubice utěsněn.

U-trubicové tlakoměry

Trubice ve tvaru U vyrobená ze skla nebo jiného materiálu (plexi,...) se dvěmi větvemi umístěnými svisle (obr. 2.3). Lze použít i dvě samostatné trubice s tím, že koleno je nahrazeno pružnou hadičkou. U-trubice jsou naplněny tlakoměrnou kapalinou o určité hustotě ρ_2 .



Obr. 2.3 Schéma U-trubicového tlakoměru

Je-li jeden konec tlakoměru otevřený a působí na něj tlak okolní atmosféry, měříme potom přetlak nebo podtlak. Velikost tohoto tlaku p určíme ze vztahu:

$$p = h \cdot g \cdot (\rho_2 - \rho_1) \text{ [Pa]} \quad (2.7)$$

Můžeme měřit i dva současně působící rozdílné tlaky a dostaneme tak rozdíl tlaků Δp .

$$\Delta p = p_1 - p_2 = h \cdot g \cdot (\rho_2 - \rho_1) \text{ [Pa]} \quad (2.8)$$

Délka stupnice obvykle vyráběných U-trubicových tlakoměrů činí 300 až 500 mm. Maximální délka se kterou se můžeme v praxi setkat je 2 m. Stupnice bývá paralelní s trubicemi, někdy mohou být stupnice dvě pro každou trubici zvlášť. Cejchování stupnice bývá řešeno v jednotkách délky (většinou v mm), lze se však setkat i s jednotkami tlaku.

Měřicí rozsah U-trubicových tlakoměrů lze zvýšit jejich řazením do série nebo použitím tlakoměru s jednou trubicí uzavřenou (tzv. kompresní tlakoměry). Tyto jsou popsány v literatuře [3].

Výhody U-trubicových tlakoměrů - jsou přesné, spolehlivé, jednoduché a levné

Nevýhody – možnost chyby při odečtu, nutné číst výchylky u obou ramen

Nádobkové tlakoměry a Kapalinové tlakoměry se šikmou trubicí

Jedná se o jinou formu U-trubicových tlakoměrů, kdy je jedno z ramen nahrazeno nádobkou a druhé rameno je ve svislé či šikmé poloze. Oba typy jsou popsány v literatuře [3].

2.1.3 Převodníky tlaku

Jsou to zařízení, která převádí měřený tlak na libovolný výstupní signál. Ten může být hydraulický, pneumatický nebo nejčastěji používaný - elektrický. Elektrický signál může být ve formě proudového výstupu nejčastěji s rozsahem 0 – 20 mA případně 4 – 20 mA, nebo napěťového výstupu s rozsahy 0 – 5 V, 0 – 10 V nebo i jinými. Změna elektrické veličiny, kterou může být kapacita, odpor nebo jiné je vyvozena deformačním působením tlaku na tlakoměrný prvek. Zpracování této změny se na výstupu z převodníku projeví změnou elektrického napětí nebo proudu. Všechny konstrukční provedení převodníků lze použít pro měření přetlaku, podtlaku, absolutního a diferenčního tlaku. O velikosti měřeného tlaku můžeme být informováni přímo v místě měření a to při vybavení převodníku displejem.

V závislosti na vyhodnocované elektrické veličině rozlišujeme převodníky odporové, indukční, kapacitní, piezorezistentní a rezonanční.

Odporové převodníky tlaku (tenzometry)

Deformace tlakoměrného prvku je převáděna na změnu elektrického odporu. Deformační člen je tvořen membránou, na kterou se nejčastěji lepením připevňují tenzometry. Odporové převodníky tlaku jsou vyráběny polovodičové nebo kovové a měří v rozsahu (0,01 ÷ 50) MPa.

Indukční převodníky tlaku

Změna měřeného tlaku je zachycována citlivým elastickým snímačem. Snímač je tvořen jádrem s cívkou, na které se produkuje změna indukčnosti. Tlak působí na snímač a ten svou výchylku přeneseme na jádro. To vyvolá změnu výstupního signálu.

Kapacitní převodníky tlaku

Hlavním prvkem těchto převodníků je kapacitní snímač. Alespoň jednu elektrodu kapacitního snímače tvoří deformační člen (membrána nebo vlnovec). Ten může být kovový, keramický nebo polovodičový. U těchto převodníků se využívá zejména princip změny vzdálenosti elektrod. Měřicí rozsah se pohybuje v rozmezí 100 Pa až 40 MPa.

Další typy převodníků tlaku jsou:

Piezoelektriké, Rezonanční, Světlovodné a Inteligentní snímače tlaku

Tyto převodníky tlaku včetně výše zmíněných jsou podrobně zpracovány v literatuře [3].

2.1.4 Číslicové (digitální) tlakoměry

Tyto tlakoměry zpracovávají silový účinek tlaku na různých principech, všechny však naměřenou hodnotu zobrazují digitálně na displeji. Silový účinek měřeného tlaku je nejčastěji přímo převáděn na elektrický signál, stejně jako u převodníků tlaku. Můžeme se setkat s číslicovými tlakoměry, které fungují na stejném principu jako deformační tlakoměry, jen mechanická ručička zobrazující naměřenou hodnotu je nahrazena elektronikou, která rozdíl velikosti deformace tlakoměrného prvku vyhodnotí jako číselný údaj. Existují také tlakoměry, které silový účinek pístu nebo zvonu elektricky vyhodnotí a zobrazí jako číselnou hodnotu.

Název *číslicové tlakoměry* nepopisuje princip snímání tlakové síly, ale pouze prozrazuje systém, jakým jsou naměřené údaje zobrazeny.

Číslicové tlakoměry jsou zpravidla tvořeny těmito částmi:

- *Převodník tlaku* zajišťuje transformaci měřeného tlaku na elektrický signál. Především tento prvek rozhoduje o přesnosti a stabilitě měřidla. Jeho vlastnosti se dají ještě mírně zlepšit dalšími přidanými obvody.
- *Analog-digitální převodník* slouží k převodu elektrického signálu na digitální číslice zobrazované na displeji měřidla. Mimo to dokáže nastavovat parametry měřidla, jako jsou počet dekadických míst, jednotky změřeného tlaku, rychlost měřicího cyklu apod.
- *Korekční obvody* u převodníku tlaku v rámci možností korigují chyby, kterými mohou být teplotní závislost, nelinearitu aj.
- *Periferní obvody* umožňují komunikaci měřidla s počítačem. Jejich prostřednictvím lze získávat a zaznamenávat naměřené hodnoty a také nastavovat samotné měřidlo.
- *Komunikační část* zahrnuje displej, na kterém se zobrazují naměřené hodnoty a nastavované parametry a dále potom klávesnici, pomocí které ovládáme a nastavujeme měřidlo.

2.1.5 Další druhy měřidel tlaku

Jsou jimi pístové tlakoměry, barometry a vakuometry. Ty však svým zaměřením nemají pro tuto práci stěžejní význam a proto se jim nebudeme více věnovat. Podrobně popsány jsou v literatuře [3].

3 Měření průtoku a rychlosti proudění skutečných tekutin

Pro měření průtoku tekutiny se využívá mnoho principů a různých měřicích systémů [3]. Hlavní metody měření vychází z určování střední rychlosti proudění nebo stanovení objemu, případně hmotnosti proteklé tekutiny za určitou dobu. V závislosti na požadavcích a provozních podmínkách (tlak, teplota, hustota, el. vodivost, atd.) se volí vhodný systém měření pro daný typ měřidla. Správná funkce průtokoměrů je také úzce spjata s typem proudění tekutiny (laminární nebo turbulentní proudění).

Měřený průtok tekutiny lze vyjádřit jako objemový Q_v [$m^3 \cdot h^{-1}$] nebo hmotnostní Q_m [$kg \cdot s^{-1}$]. Mezi těmito průtoky platí vztah:

$$Q_m = Q_v \cdot \rho \quad [kg \cdot s^{-1}] \quad (3.1)$$

3.1 Metody měření průtoku

3.1.1 Objemová metoda měření průtoku

Tato metoda vychází z objemového průtoku Q_v nebo hmotnostního průtoku Q_m tekutiny vyjádřených jako objemové množství V nebo hmotnostní množství m proteklé za určitý čas.

Při ustáleném proudění tekutiny se průtoky počítají následovně:

$$Q_v = \frac{V}{t} \quad [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (3.2)$$

$$Q_m = \frac{m}{t} = Q_v \cdot \rho = \frac{V}{t} \cdot \rho \quad [kg \cdot s^{-1}] \quad (3.3)$$

Princip, na základě kterého tyto objemová měřidla pracují, spočívá v postupném plnění a následném vyprazdňování měřícího prostoru. To může probíhat spojitě nebo nespojitě v závislosti na konkrétním typu měřidla.

3.1.2 Rychlostní metoda měření průtoku

Měřený průtok je definován jako součin plochy průtočného průřezu S a střední rychlosti proudění tekutiny v_s , kde:

$$Q_v = S \cdot v_s \quad [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (3.4)$$

$$Q_m = Q_v \cdot \rho = S \cdot v_s \cdot \rho \quad [kg \cdot s^{-1}] \quad (3.5)$$

Princip funkce těchto měřidel spočívá v měření střední rychlosti proudící tekutiny. Měřidla pracující na tomto principu nazýváme rychlostní průtokoměry a lze je rozdělit do dvou skupin.

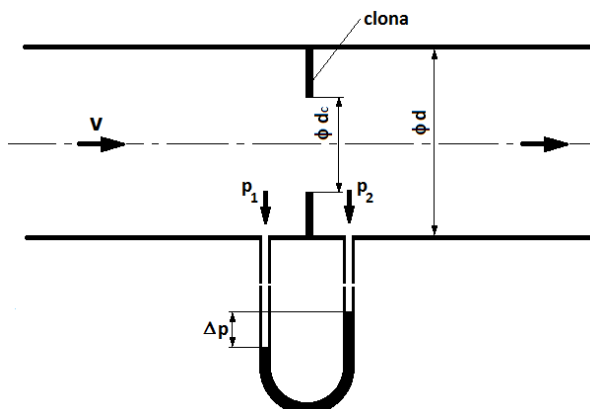
První skupinu těchto měřidel tvoří průtokoměry s konstantním průtočným průřezem. Při měření vychází z aktuální střední rychlosti proudění tekutiny. Tyto měřidla jsou nejčastější.

V druhé skupině jsou průtokoměry s konstantní střední rychlostí proudění. Průtok je určen z aktuální velikosti průtočného průřezu, přičemž průtočná plocha je proměnlivá.

3.2 Měřidla průtoku a rychlosti

3.2.1 Průřezová měřidla - clona

Při měření využívá toto průřezové měřidlo fyzikální princip Bernoulliho jevu. Tento jev nastane, když do potrubí vložíme škrťací orgán, skrze který musí tekutina následně proudit (obr. 3.1). Tím dojde ke zvýšení rychlosti proudění tekutiny a ke snížení statického tlaku za škrťacím orgánem (clonou). Vzniklá difference tlaků před a za clonou je přímo úměrná druhé mocnině rychlosti proudění. Každá clona má specifické parametry pro svůj konkrétní tvar a velikost, ze kterých lze poté vypočítat rychlost proudění, objemový nebo hmotnostní průtok.



Obr. 3.1 Měření průtoku pomocí clony

Nejčastěji používaná je normalizovaná clona, což je deska s kruhovým otvorem umístěná souose s potrubím. Vstupní hrana otvoru je zpravidla ostrá, pravoúhlá. Měří se rozdíl tlaků $\Delta p = (p_1 - p_2)$ [Pa] snímáný v bezprostřední vzdálenosti před a za clonou, ze kterého se vypočítá objemový průtok Q_v .

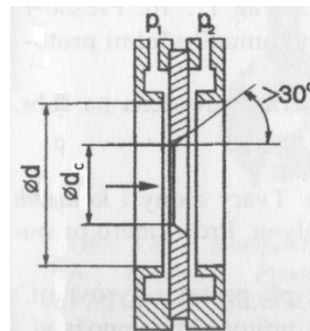
$$Q_v = C \cdot \varepsilon \cdot \left(\frac{d_c}{d} \right)^2 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} \quad [m^3 \cdot h^{-1}] \quad (3.6)$$

Kde C [-] je součinitel průtoku pro danou clonu (určí se z tabulek nebo z grafu) a ε [-] je expanzní součinitel.

Rychlost proudění a následně průtok můžeme také vypočítat z cejchovní křivky dodané ke cloně. Cejchovní křivka je popsána rovnicí, ze které po dosazení tlakového spádu na cloně Δp [Pa] získáme střední rychlost proudění tekutiny v_s [$m \cdot s^{-1}$]. Objemový průtok Q_v pak vypočítáme:

$$Q_v = v_s \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (3.7)$$

Odběr tlaku může být u menších světlostí potrubí komorový (obr. 3.2) a u větších světlostí bodový. Pro potrubí o průměrech DN 50 až DN 1000 jsou clony normalizovány dle normy ČSN ISO 5167-1.



Obr. 3.2 Normalizovaná clona s komorovým odběrem tlaků [3]

Poměrně značná je u těchto měřidel trvalá tlaková ztráta, která se určí na základě vztahu:

$$\Delta p_z = \left(1 - \left(\frac{d_c}{d} \right)^2 \right) \cdot \Delta p [Pa] \quad (3.8)$$

Clony se vyrábějí i v dalších tvarech jako jsou excentrická, čtvrtkruhová, segmentová,... Pro zajištění přesného měření jsou vyžadovány rovné úseky potrubí před i za clonou. Jejich délky jsou různé v závislosti na světlosti potrubí.

Potřebné veličiny se získávají připojením měřicích přístrojů (tlak, teplota,...) k odběrným místům průřezového měřidla.

Měřicí rozsah clony je standardně 1:3 až 1:4 při přesnosti měření $\pm 1 \%$ až $\pm 3 \%$. Multifunkční převodníky mají díky sdruženým snímačům méně odběrných míst čímž je sníženo riziko případných úniků. Jejich měřicí rozsah se pohybuje v rozmezí 1:8 až 1:10, kdy přesnost měření je $\pm 1 \%$ a lepší. Největšího měřicího rozsahu až 1:100 dosahují clony s proměnným průtočným průřezem.

Výhody průřezových měřidel:

- levné a jednoduché
- vhodné pro velké rozsahy průměrů potrubí
- použitím multifunkčního převodníku lze dosáhnout zvýšené přesnosti měření
- měřidlo se kalibruje proměřením jeho geometrických rozměrů a kalibrací snímačů

Nevýhody průřezových měřidel:

- velká tlaková ztráta
- mají nelineární závislost
- rozsah měření je malý

3.2.2 Kolenové průtokoměry

Jsou to jednoduchá měřidla pro měření rychlosti. Základním prvkem je koleno s hladkým vnitřním povrchem a dvěma otvory pro odběr statického tlaku. Tyto otvory jsou umístěny naproti sobě z vnitřní a vnější strany kolena (obr. 3.3) a je k nim připojeno měřidlo tlaku. Diference tlaků vzniká vlivem odstředivé síly proudícího média na vnější stranu ohybu, přičemž platí, že $p_2 > p_1$. Z jejich rozdílu vypočteme střední rychlost proudění v_s .

$$\Delta p = p_2 - p_1 \text{ [Pa]} \quad (3.9)$$

$$v_s = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (3.10)$$

Objemový průtok pak vypočítáme:

$$Q_V = \alpha_k \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot v_s \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (3.11)$$

kde α_k je průtokový součinitel kolena a r_s je střední poloměr zakřivení kolena.

$$\alpha_k = 1,057 \cdot \sqrt{\frac{r_s}{d}} - 0,103 \text{ [-]} \quad (3.12)$$

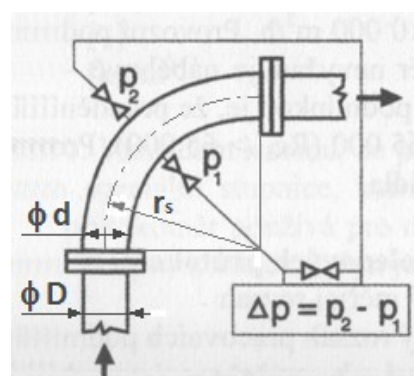
Světlosti potrubí kolenových průtokoměrů se pohybují v rozmezí 15 až 500 mm. Maximální teplota proudícího média může být +600 °C a maximální tlak do 35 MPa. Průtok se pohybuje mezi 10 až 10000 m³·h⁻¹. Tyto měřidla vyžadují turbulentní proudění měřené tekutiny. Jsou velmi jednoduché a vhodné pro použití v provozu.

Výhody kolenových průtokoměrů:

- široký rozsah pracovních podmínek
- velký rozsah průtoku
- levné a jednoduché měřidlo
- minimální tlaková ztráta
- nevyžaduje usměrňovací potrubí

Nevýhody kolenových průtokoměrů:

- menší přesnost měření



Obr. 3.3 Kolenový průtokoměr [3]

3.2.3 Další měřidla

Měřidel pro měření průtoků a rychlostí je velké množství. Popsána jsou v literatuře [3].

4 Návrh experimentální měřicí tratě

Měření místních ztrát na vybraných ventilech probíhalo na experimentálních měřicích tratích, sestavených ve školní laboratoři mechaniky tekutin na místnosti E306. Vytvořené tratě k stanovení součinitele místních ztrát se od sebe odlišují v důsledku potřeb a charakteru jednotlivých měřených prvků. Další odlišnosti v experimentálních měřicích tratích jsou zapříčiněny způsobem měření průtoku odlišnými metodami.

4.1 Způsoby měření průtoku vzduchu

Měření průtoku vzduchu jsem realizoval dvěma typy měřidel. Prvním typem byl digitální průtokoměr fungující na principu žárového anemometru. Jako druhé měřidlo jsem použil kolenový průtokoměr, který funguje na principu rozdílu tlaků na vnější a vnitřní straně kolenového měřidla. Přesný způsob funkce je popsán v kapitole 3.2.2. Průtok byl u všech měřených prvků v každé jejich konkrétní poloze měřen digitálním i kolenovým průtokoměrem.

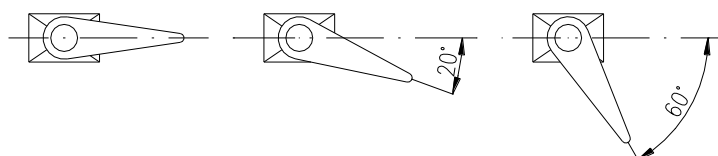
4.2 Způsob měření tlakových ztrát na měřicím prvku

Tlakové ztráty na prvku byly vždy měřeny diferenčním způsobem. Odběrná místa pro získání statického tlaku byla umístěna v určité vzdálenosti před a za měřeným prvkem. V případě kolenového průtokoměru byla tato odběrná místa na vnitřní a vnější straně kolenového měřidla. Rozdíly tlaků byly snímány diferenčními digitálními převodníky tlaku od firmy AHLBOR (Almemo typ FD A602-S6K (obr. 5.5) a typ FD8612DPS obr. 5.6). Samotné vyhodnocení výstupního signálu z těchto převodníků a zobrazení číselné hodnoty tlakové difference zajišťovalo vyhodnocovací zařízení Almemo 2290-3 (obr. 5.4).

4.3 Měřené prvky k stanovení součinitele místních ztrát

Hlavní náplní této práce je určit ztrátové součinitele různých ventilů ve vybraných polohách přiškrcení při co největším rozsahu průtoku vzduchu měřenými prvky. Jako zkušební prvky jsem vybral plastový kohout o světlosti 32 mm (obr. 5.8), plastový ventil také o světlosti 32 mm (obr. 5.9) a starý kovový ventil se závitovým napojením o velikosti $\frac{3}{4}$ " (obr. 5.10). Plastový kohout a ventil se napojily přímo do systému měřicí tratě, která má standardní potrubí světlost 46 mm. Kovový ventil se do systému napojil pomocí redukce.

Plastový kohout byl měřen v rozsahu poloh 0° (plně otevřen) až 60° v krocích po 20° (obr. 4.1). V poloze 90° je již kohout plně uzavřen.



Obr. 4.1 Schéma kohoutu v pozici plně otevřeno, přivřeno na 20° a přivřeno na 60°

Plastový ventil lze regulovat v rozsahu 7 otáček. Měření bylo provedeno v poloze plně otevřeno, přivřeno na 5 ze 7 otáček a přivřeno na 6 ze 7 otáček. Při 7 otáček ze 7 je ventil plně uzavřen. Přivření ventilu na 1. až 4. otáčku vykazovalo jen minimální rozdíly v naměřených hodnotách průtoku a tlakové ztráty na prvku, proto byly pro měření zvoleny výše uvedené polohy.

Kovový ventil je regulovatelný v rozsahu 3,5 otáčky. Měření proběhlo v polohách plně otevřeno, přivřeno na 1 ze 3,5 otáčky a přivřeno na 2 ze 3,5 otáčky.

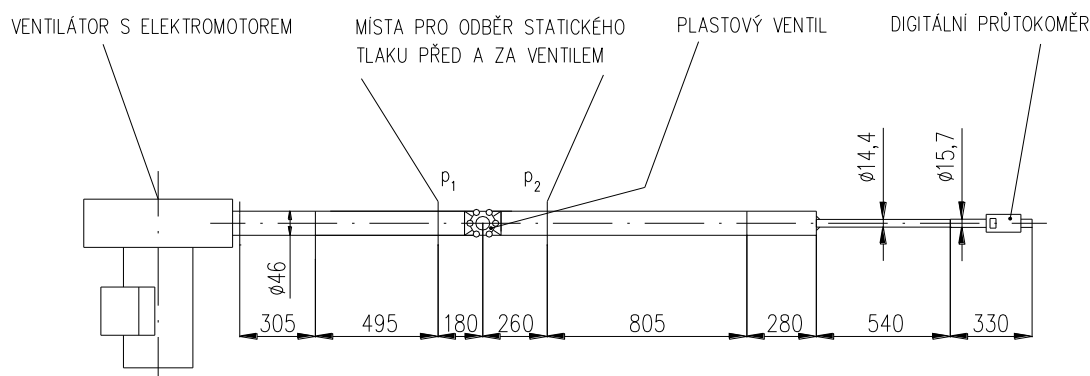
4.4 Navržené měřicí tratě

Každá měřicí trať obsahovala ventilátor poháněný elektromotorem, který je ovládán frekvenčním měničem. Trať se od sebe odlišují v zapojeném měřeném prvku, jeho nepojením do měřicí trati a způsobem měření průtoku vzduchu.

4.4.1 Měření digitálním průtokoměrem

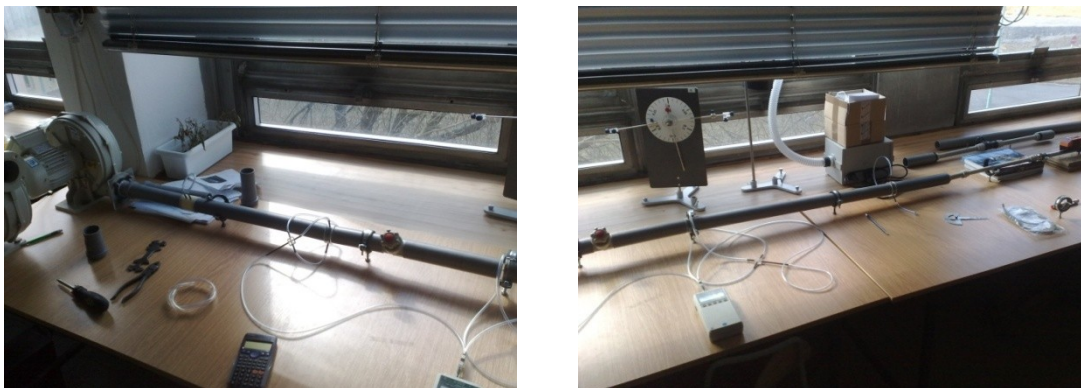
Varianta trati s vloženým plastovým ventilem (varianta I.)

Sestavení experimentálních tratí probíhalo na již předpřipraveném standu, na kterém standardně probíhá měření třecích ztrát na vzduchové trati. Původní sestava byla rozebrána, kdy na svém místě zůstal pouze ventilátor s elektromotorem. Následně nově sestavená trať svými prvky odpovídala potřebám konkrétního měření. Na výstup z ventilátoru byla upevněna plastová trubka o světlosti 46 mm (obr. 4.3), která byla v určité vzdálenosti před měřeným ventilem rozdělena a do tohoto místa byl vložen kroužek pro odběr statického tlaku (ozn. P_1 v obr. 4.2). Následoval měřený ventil, na který poté navazovala přímá plastová trubka. Ta byla v určité vzdálenosti od ventilu opět rozdělena a do vzniklé mezery byl vložen další kroužek pro odběr statického tlaku (ozn. P_2 v obr. 4.2). Na výstupu z plastové trubky byl zapojen průtokoměr, v tomto konkrétním případě se jednalo o digitální průtokoměr. Digitální průtokoměr má světlost měřicí trubky 15,7 mm, čímž bylo nutné požití redukce pro napojení průtokoměru z výchozí světlosti 46 mm. Konkrétní rozměry a světlosti potrubí sestavené měřicí trati včetně použitých prvků jsou zakresleny ve schématu obr. 4.2.



Obr. 4.2 Schéma experimentální trati s vloženým plastovým ventilem (rozměry v mm)

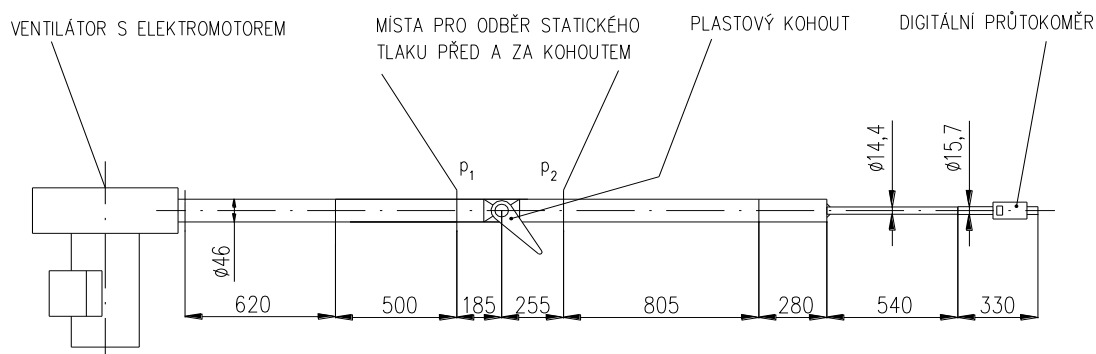
Reálná podoba sestavené tratě je zobrazena na obr. 4.3.



Obr. 4.3 Sestava skutečné měřicí tratě

Varianata trati s vloženým plastovým kohoutem (varianata II.)

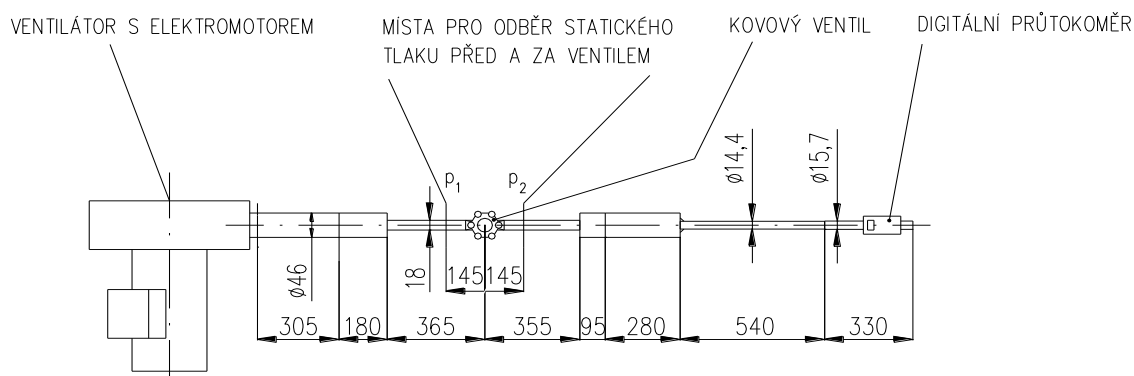
Tato varianta je podobná variantě I., kdy byl plastový ventil nahrazen plastovým kohoutem (obr. 4.4).



Obr. 4.4 Schéma experimentální tratě s vloženým plastovým kohoutem (rozměry v mm)

Varianata trati s vloženým kovovým ventilem (varianata III.)

Oproti variantám I. a II. došlo v tomto případě k zúžení světlosti potrubí i uprostřed měřicí trati. To je způsobeno měřením kovového ventilu, který má světlost $\frac{3}{4}$ ", na kterou bylo nutno průřez redukovat a tím došlo i k přemístění odběrných míst statického tlaku (ozn. p_1 a p_2) na měřeném prvku (obr. 4.5).

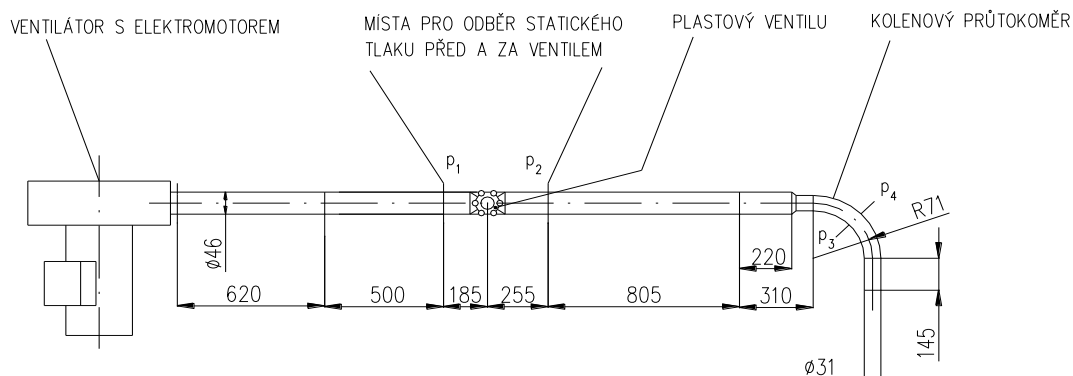


Obr. 4.5 Schéma experimentální tratě s vloženým kovovým ventilem (rozměry v mm)

4.4.2 Měření kolenovým průtokoměrem

Varianta trati s vloženým plastovým ventilem (varianta IV.)

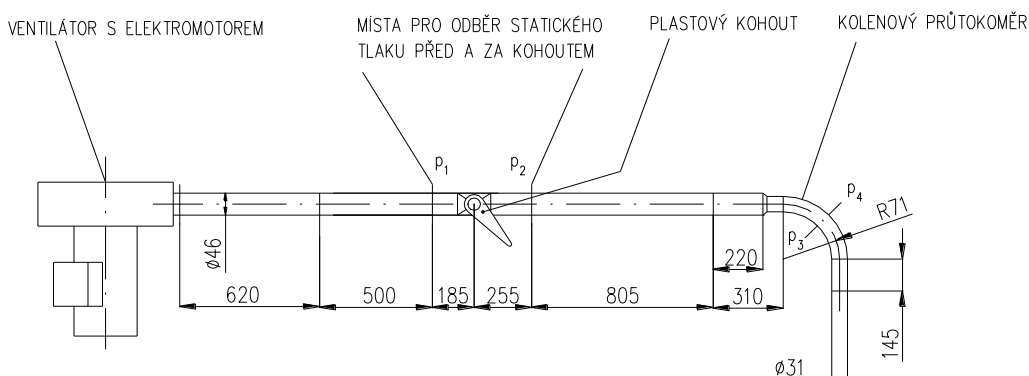
Měřicí trať je podobná variantě I. s použitým digitálním průtokoměrem. Rozdíl je v použití kolenového průtokoměru místo digitálního průtokoměru (obr. 4.6).



Obr. 4.6 Schéma experimentální tratě s vloženým plastovým ventilem (rozměry v mm)

Varianta trati s vloženým plastovým kohoutem (varianta V.)

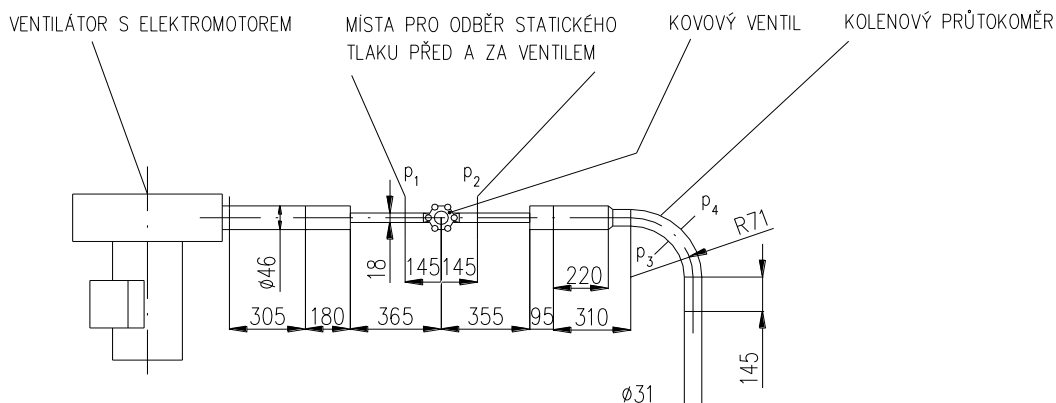
Oproti variantě IV. je rozdíl pouze v požití plastového kohoutu (obr. 4.7).



Obr. 4.7 Schéma experimentální tratě s vloženým plastovým kohoutem (rozměry v mm)

Varianta trati s vloženým kovovým ventilem (varianta VI.)

Experimentální trať je téměř totožná s variantou III. Rozdíl je zde pouze v použití kolenového průtokoměru místo digitálního (obr. 4.8).



Obr. 4.8 Schéma experimentální tratě s vloženým kovovým ventilem (rozměry v mm)

5 Specifikace prvků a měřidel

Podklady pro specifikaci jednotlivých prvků jsou čerpány z návodu pro měření třecích ztrát na vzduchové trati [4] a z podkladů od jednotlivých výrobců umístěných na internetu.

Experimentální měřicí tratě jsou sestaveny z těchto prvků:

- Ventilátor s elektromotorem
- Frekvenční měnič
- Digitální průtokoměr
- Vyhodnocovací zařízení Almemo 2290-3
- Digitální převodníky tlaku Almemo typ FD A602-S6K a typ FD8612DPS
- Kolenový průtokoměr
- Plastový kohout kulový
- Plastový ventil přímý
- Kovový ventil přímý
- Potrubí
- Kroužky pro odběr statického tlaku

Ventilátor s elektromotorem

Typ:	HRD 1 TFU-105Hz/0,75 kW
Výrobce:	Energoekonom, spol. s.r.o.
Tlak:	4900 Pa
Průtok:	11 m ³ ·min ⁻¹
Výkon elektromotoru:	0,75 kW
Napětí:	3 x 400 V
Frekvence:	105 Hz
Otáčky:	6200 min ⁻¹



Obr. 5.1 Ventilátor s elektromotorem [5]

Frekvenční měnič

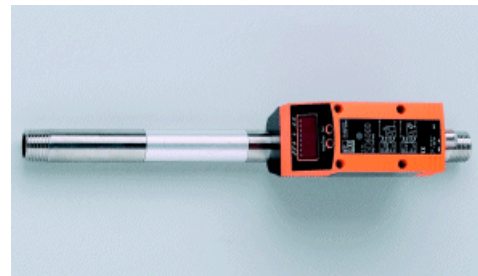
Typ:	Combivert F5-B (Basic)
Výrobce:	Karl E. Brinkmann GmbH
Výkon:	0,75 kW
Napájení:	3 x 400 V



Obr. 5.2 Frekvenční měnič [4]

Digitální průtokoměr

Typ:	SD6000
Výrobce:	ifm electronic
Rozsah průtoku:	$0 \div 1500 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$
Zobrazovaný krok:	$1 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$
Přesnost:	$\pm 3 \%$



Obr. 5.3 Digitální průtokoměr [6]

Vyhodnocovací zařízení

Typ:	Almemo 2290-3
Výrobce:	AHLBOR GmbH
Napájení:	9 V
Vstup:	2 analogové vstupy
Výstup:	2 analogové výstupy



Obr. 5.4 Vyhodnocovací zařízení [4]

Digitální převodník tlaku

Typ:	Almemo FD A602-S6K
Výrobce:	AHLBOR GmbH
Měřicí rozsah:	$0 \div 6800 \text{ Pa}$
Výstup:	analogový ($6 \div 13 \text{ V}$)
Přesnost:	$\pm 0,5 \%$



Obr. 5.5 Digitální převodník tlaku

Digitální převodník tlaku

Typ:	Almemo FD8612DPS
Výrobce:	AHLBOR GmbH
Měřicí rozsah:	$0 \div 2500 \text{ Pa}$
Výstup:	analogový ($0 \div 10 \text{ V}$)
Napájecí napětí:	6 V
Přesnost:	$\pm 1 \%$
Přetížitelnost:	pěti násobná



Obr. 5.6 Digitální převodník tlaku

Kolenový průtokoměr

Kolenový průtokoměr byl vyroben ze svodového kolena o světlosti 31 mm a středním poloměru oblouku 71 mm. Místa pro odběr tlaku leží na vnitřní a vnější straně oblouku kolenového měřidla jak je patrné z obr. 5.7. Přesný způsob funkce je popsán v kapitole 3.2.2.

Výrobce: VŠB



Obr. 5.7 Kolenový průtokoměr

Plastový kohout kulový

Výrobce: FV-Plast

Světlost: 32 mm



Obr. 5.8 Plastový kohout kulový

Plastový ventil přímý

Výrobce: FV-Plast

Světlost: 32 mm

Počet otáček: 7



Obr. 5.9 Plastový ventil přímý [7]

Kovový ventil přímý

Připojovací závit: 3/4"

Počet otáček: 3,5

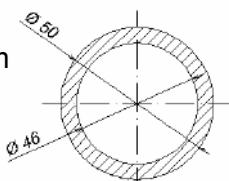


Obr. 5.10 Kovový ventil přímý

Potrubí

Materiál: plast

Světlost: 46 mm



Obr. 5.11 Plastové potrubí [4]

Kroužek pro odběr statického tlaku

Materiál: plast

Světlost: 50 mm



Obr. 5.12 Kroužek pro odběr statického tlaku

6 Postup měření na experimentálních tratích

Popis samotného měření na konkrétní experimentální trati definuji pro variantu V. s použitým kolenovým průtokoměrem viz. [4.4.2]. V tomto uspořádání byly měřeny součinitele místních ztrát na plastovém kulovém kohoutu (obr. 5.8).

Trať byla sestavena v konfiguraci, jak je to zobrazeno na schématu (obr. 4.7). Kroužky pro odběr statického tlaku (obr. 5.12) označené p_1 a p_2 jsem osadil každý zvlášť silikonovou hadičkou, které byly následně připojeny do digitálního převodníku tlaku typ Almemo FD A602-S6K (obr. 5.5). Další silikonové hadičky jsem připojil k odběrným místům tlaku p_3 a p_4 na kolenovém průtokoměru (obr. 5.7). Odtud byly hadičky napojeny do digitálního převodníku tlaku typ Almemo FD8612DPS (obr. 5.6). Oba digitální převodníky byly současně připojeny do vyhodnocovacího zařízení Almemo 2290-3 (obr. 5.4). Vyhodnocovací zařízení umí zobrazit naměřenou diferenci tlaku pouze jednoho snímače, proto se při měření v konkrétní pozici ventilu a konkrétním průtoku muselo mezi oběma převodníky tlaku přepínat pro odečtení obou hodnot.

Měřený plastový kohout jsem nastavil do polohy, kdy byl plně otevřen (obr. 4.1). Celé zařízení je uvedeno do provozu zapnutím hlavního jističe, který napájí frekvenční měnič (obr. 5.2). Na frekvenčním měniči byla postupně nastavována frekvence od 15 do 100 Hz. Tím byly určeny otáčky elektromotoru pohánějícího ventilátor (obr. 5.1). První měření probíhalo při nejnižším průtoku vzduchu, kdy na frekvenčním měniči bylo nastaveno 15 Hz. Odečetl jsem diferenci tlaku na měřeném kohoutu a následně diferenci tlaku na kolenovém průtokoměru. Proběhlo proměření prvku v dané pozici pro daný frekvenční rozsah v následujících krocích: 15, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 Hz. Po dokončení proměření v kompletním rozsahu frekvencí byl ventilátor vypnut a kohout přestaven do další z proměřovaných poloh (obr. 4.1). Polohu přiškrcení kohoutu jsem určoval pomocí úhlooměru. Přestavený kohout byl opět proměřen v kompletním rozsahu frekvencí. Analogickým způsobem se postupovalo až do proměření kohoutu ve všech požadovaných polohách.

V případě měření plastového ventilu (obr. 5.9) byl postup totožný. Ventil byl proměřen v poloze plně otevřeno, následně byl přivřen na 5. z celkových sedmi otáček a nakonec byl přivřen na 6. ze sedmi otáček.

Kovový ventil byl měřen opět stejným způsobem jako předchozí prvky. Jeho měřené polohy byly plně otevřeno, přivřen na 1 ze 3,5 otáčky a přivřen na 2 ze 3,5 otáčky. V tomto případě však nebyly na měřicí trati použity kroužky pro odběr statického tlaku před a za prvkem, ale tlak byl odebírán z plastových trubek, které sloužily jako redukce pro napojení kovového ventilu do měřicí trati. Tyto trubky byly záměrně ponechány delší, aby se docílilo

ustálení proudu vzduchu před a za prvkem. Zároveň se přímo do těchto trubek vyvrtaly otvory pro odběr tlaku před a za ventilem, aby bylo zajištěno dosažení přesnějších výsledků (obr. 4.8).

Všechna tato měření proběhla ještě jednou a to za použití digitálního průtokoměru místo kolenového. Jediný rozdíl spočíval v tom, že se na vyhodnocovacím zařízení neodečítala hodnota tlakové difference náležící kolenovému průtokoměru, ale odečítala se přímo aktuální hodnota průtoku vzduchu v $\text{dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ na displeji digitálního průtokoměru.

Všechny naměřené hodnoty jsem zaznamenal do tabulek a k nim následně vykreslil grafy.

7 Vyhodnocení měření

7.1 Vyhodnocení součinitele místních ztrát a Reynoldsova čísla pro hodnoty naměřené kolenovým průtokoměrem

Obecný postup výpočtu:

- a) Na vyhodnocovacím zařízení jsem odečetl velikost tlakové ztráty $\Delta p_1 = p_1 - p_2$ měřeného prvku a tlakovou ztrátu $\Delta p_2 = p_3 - p_4$ na kolenovém průtokoměru (obr. 4.7). Následně jsem tyto hodnoty zapsal do tabulky.

- b) Velikost střední rychlosti proudění vzduchu v koleni $v_{s,k} [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$ dostaneme z rovnice:

$$v_{s,k} = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p_2}{\rho}}$$

- c) Objemový průtok $Q_{v-k} [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$ vychází ze vztahu pro výpočet kolenového průtokoměru kapitola 3.2.2.

$$Q_{v-k} = \alpha_k \cdot \frac{\pi \cdot d_k^2}{4} \cdot v_{s,k}$$

kde $\alpha_k [-]$ je průtokový součinitel kolena a určíme ho ze vztahu

$$\alpha_k = 1,057 \cdot \sqrt{\frac{r_s}{d_k}} - 0,103$$

d) Součinitel místní ztráty měřeného prvku ξ [-] vypočítáme ze vztahu :

$$\xi = \frac{2 \cdot \Delta p_1}{\rho \cdot v_{s,k}^2}$$

e) Reynoldsovo číslo Re [-] získáme ze vztahu:

$$Re = \frac{v_{s,k} \cdot d_k}{\nu}$$

Poznámky:

d_k [mm] je vnitřní průměr kolena

r_s [mm] je střední poloměr oblouku kolenového měřidla

ρ [kg·m⁻³] je hustota vzduchu za podmínek $t = 20$ °C a $p = 0,1$ MPa

$$\rho = 1,188 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

ν [m²·s⁻¹] je kinematická viskozita vzduchu za podmínek $t = 20$ °C a $p = 0,1$ MPa

$$\nu = 15,32 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Ukázka výpočtu prvního řádku z tabulky Tab. 7.1 pro plastový kohout (plně otevřen) a kolenový průtokoměr (trať obr. 4.7)

$$v_{s,k} = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p_2}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 6}{1,188}} = 3,178 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\alpha_k = 1,057 \cdot \sqrt{\frac{r_s}{d_k}} - 0,103 = 1,057 \cdot \sqrt{\frac{71}{31}} - 0,103 = 1,4966 \text{ [-]}$$

$$Q_{v-k} = \alpha_k \cdot \frac{\pi \cdot d_k^2}{4} \cdot v_{s,k} = 1,4966 \cdot \frac{\pi \cdot 0,031^2}{4} \cdot 3,1782 = 3,59 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\xi = \frac{2 \cdot \Delta p_1}{\rho \cdot v_{s,k}^2} = \frac{2 \cdot 15}{1,188 \cdot 3,1782^2} = 2,5 \text{ [-]}$$

$$Re = \frac{v_{s,k} \cdot d_k}{\nu} = \frac{3,1782 \cdot 0,031}{1,532 \cdot 10^{-5}} = 6431 \text{ [-]}$$

Tab. 7.1 Tabulka naměřených a vypočtených hodnot

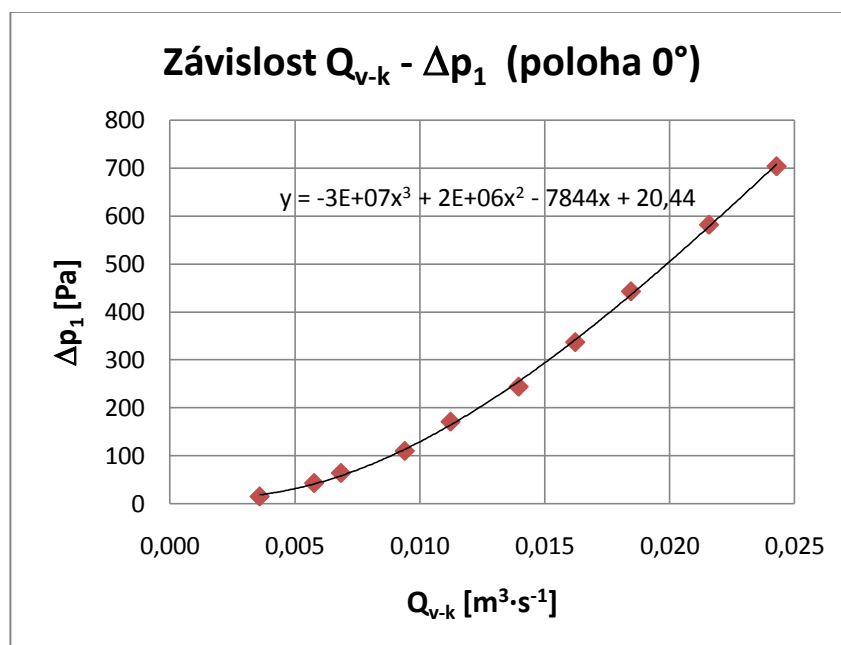
Měření č.	Naměřené hodnoty			Vypočtené hodnoty			
	f [Hz]	Δp_1 [Pa]	Δp_2 [Pa]	$v_{s,k}$ [m·s ⁻¹]	Q_{v-k} [m ³ ·s ⁻¹]	ξ [-]	Re [-]
1	15	15	6,0	3,178	0,00359	2,500	6431
2	25	43	15,5	5,108	0,00577	2,774	10337
3	30	64	21,8	6,058	0,00684	2,936	12259
:	:	:	:	:	:	:	:

Tab. 7.1 zobrazuje hodnoty pouze pro první tři měření. Kompletní tabulky naměřených a vypočtených hodnot včetně k nim vytvořených grafických závislostí jsou uvedeny v příloze.

Grafy vyobrazují tyto závislosti:

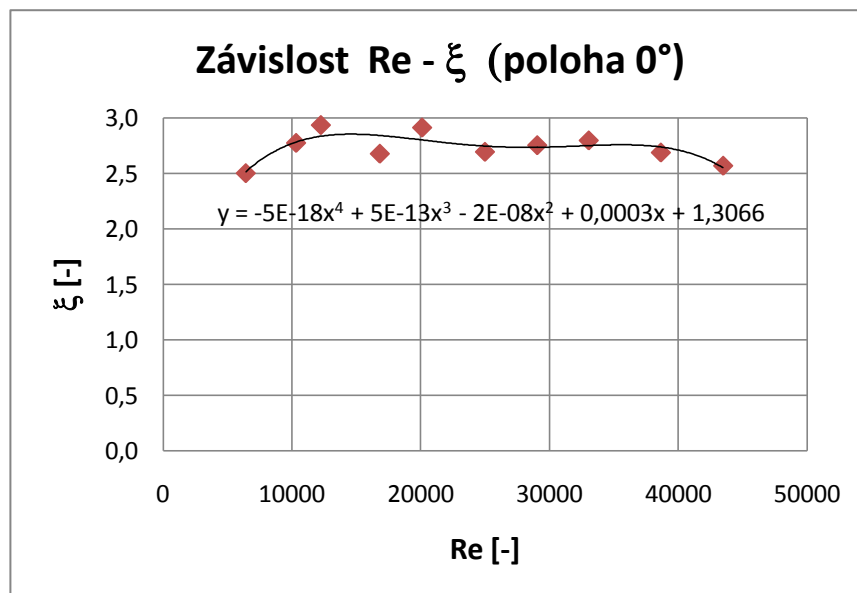
- tlakový spád měřeného prvku na průtoku ($Q_{v-k} - \Delta p_1$)
- součinitel místní ztráty na Reynoldsově čísla ($Re - \xi$)

Grafické závislosti pro plastový kohout – poloha plně otevřeno



Obr. 7.1 Závislost tlakové ztráty prvku na průtoku

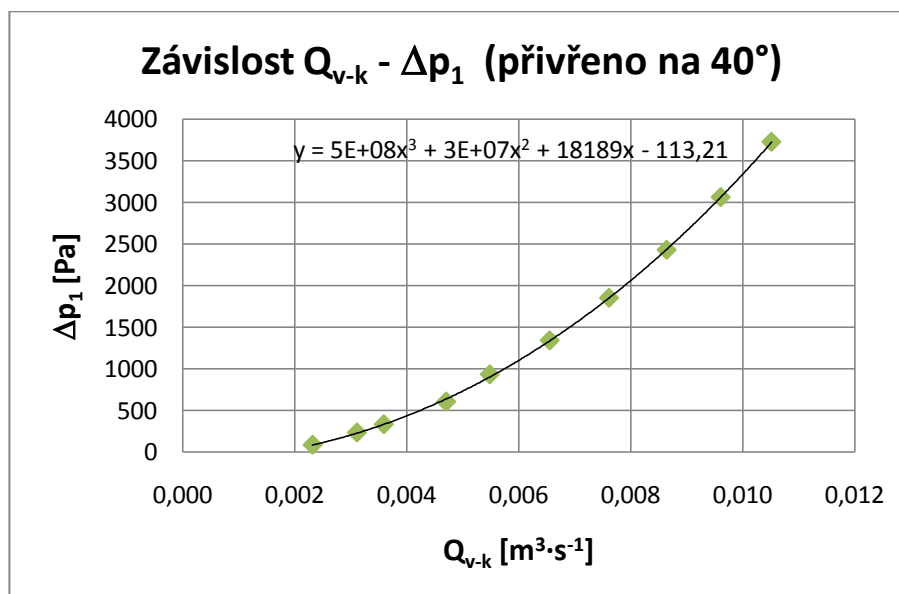
Obr. 7.1 zobrazuje závislost tlakové difference Δp_1 naměřené na plastovém kohoutu (obr. 5.8) v poloze plně otevřeno na průtoku vzduchu měřicí tratí. Se zvyšujícím se průtokem narůstá tlaková ztráta od 15 Pa do 704 Pa. Průtok má rozpětí 0,00359 m³·s⁻¹ až 0,02427 m³·s⁻¹.



Obr. 7.2 Závislost součinitele místní ztráty na Reynoldsově čísle

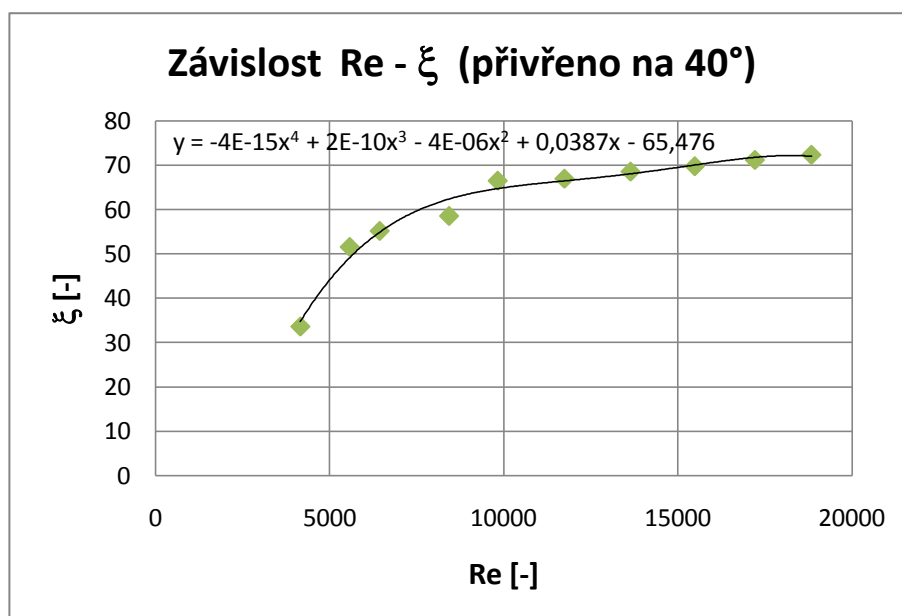
Obr. 7.2 zobrazuje závislost součinitele místní ztráty ξ naměřené na plastovém kohoutu (obr. 5.8) v poloze plně otevřeno na Reynoldsově čísle. Součinitel místní ztráty se pohybuje v rozmezí hodnot 2,5 až 2,936 a je jen minimálně ovlivněn Reynoldsovým číslem, které narůstá od 6431 do 43475.

Grafické závislosti pro plastový kohout – poloha přivřeno na 40°



Obr. 7.3 Závislost tlakové ztráty prvku na průtoku

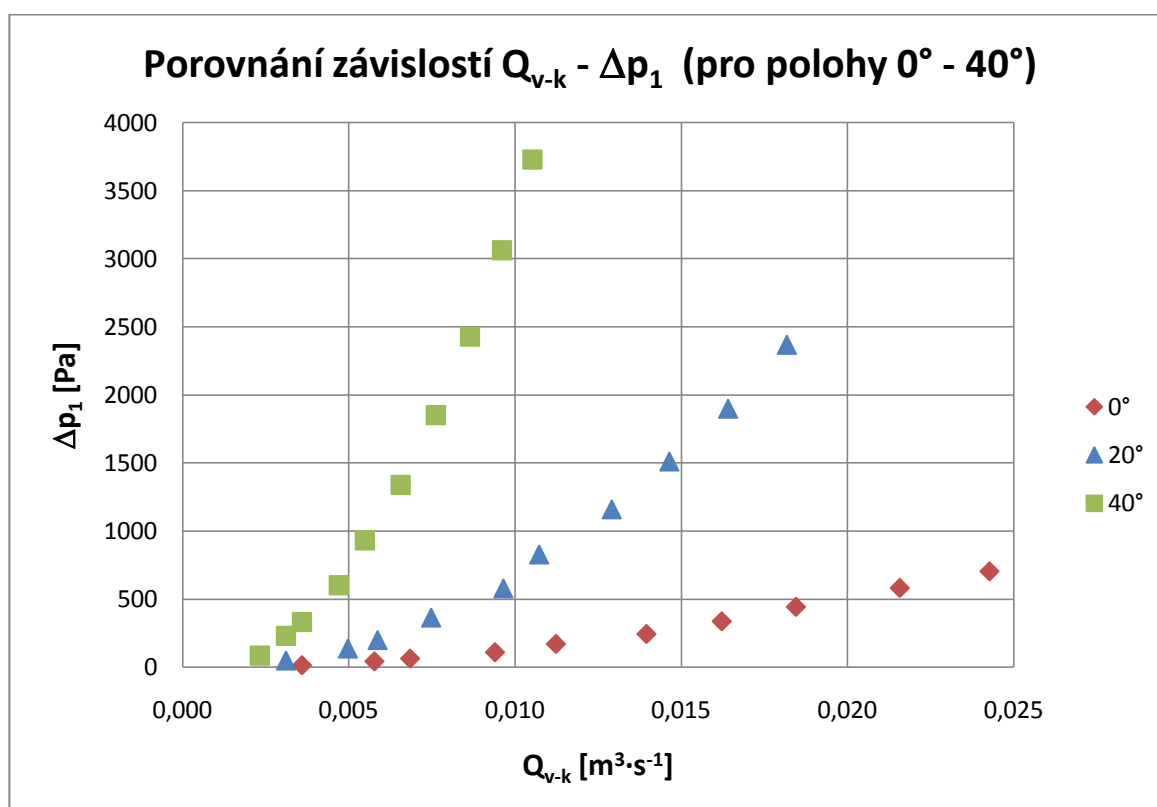
Obr. 7.3 zobrazuje závislost tlakové difference Δp_1 naměřené na plastovém kohoutu (obr. 5.8) v poloze přivřeno na 40° (obr. 4.1) na průtoku vzduchu měřicí tratí. Se zvyšujícím se průtokem narůstá tlaková ztráta od 84 Pa do 3726 Pa. Průtok má rozpětí 0,00232 m³·s⁻¹ až 0,01052 m³·s⁻¹.



Obr. 7.4 Závislost součinitele místní ztráty na Reynoldsově čísle

Obr. 7.4 zobrazuje závislost součinitele místní ztráty ξ naměřené na plastovém kohoutu (obr. 5.8) v poloze přivřeno na 40° na Reynoldsově čísle. Součinitel místní ztráty narůstá od 33,6 do 72,35, Reynoldsovo číslo má rozsah od 4151 do 18841.

Porovnání grafických závislostí prvních tří měřených poloh plastového kohoutu



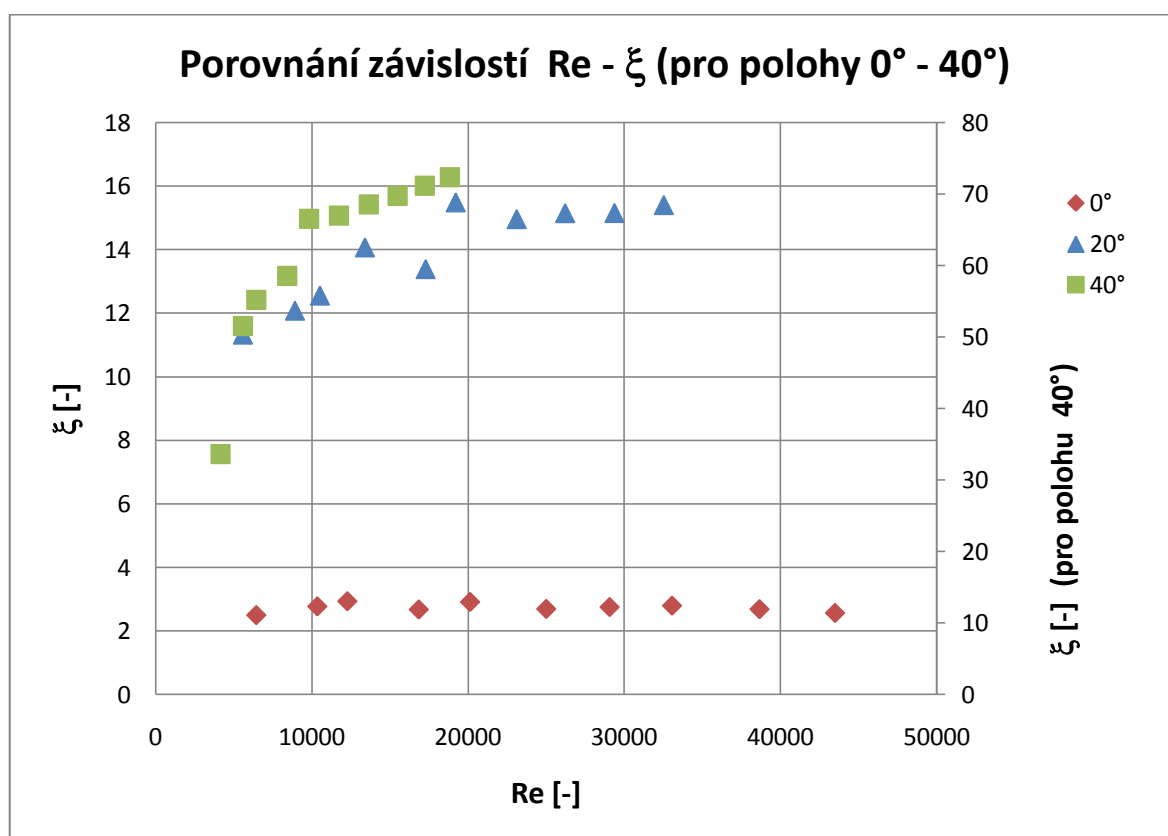
Obr. 7.5 Porovnání závislostí tlakové ztráty prvku na průtoku

Obr. 7.5 zobrazuje závislosti tlakových ztrát Δp_1 plastového kohoutu (obr. 5.8) na průtoku vzduchu měřicí tratí naměřené v polohách otevřeno a přivřeno na 20° a 40° (obr. 4.1). Se zvyšujícím se průtokem narůstají tlakové ztráty a to v závislosti na aktuální poloze kohoutu.

V poloze otevřeno tlaková ztráta narůstá od 15 Pa do 704 Pa, objemový průtok má rozsah od $0,00359 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ do $0,02427 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

V poloze přivřeno na 20° tlaková ztráta narůstá od 51 Pa do 2367 Pa, objemový průtok má rozsah od $0,00311 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ do $0,01816 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

V poloze přivřeno na 40° tlaková ztráta narůstá od 84 Pa do 3726 Pa, objemový průtok má rozsah od $0,00232 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ do $0,01052 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.



Obr. 7.6 Porovnání závislostí součinitele místní ztráty na Reynoldsově čísle

Obr. 7.6 zobrazuje závislosti součinitelů místních ztrát ξ plastového kohoutu (obr. 5.8) na Reynoldsově čísle naměřené v polohách otevřeno a přivřeno na 20° a 40°.

V poloze otevřeno se součinitel místní ztráty pohybuje v rozmezí hodnot 2,5 až 2,936 , Reynoldsovo číslo má rozsah od 6431 do 43475.

V poloze přivřeno na 20° se součinitel místní ztráty pohybuje v rozmezí hodnot 11,333 až 15,495, Reynoldsovo číslo má rozsah od 5569 do 32539.

V poloze přivřeno na 40° součinitel místní ztráty narůstá od 33,6 do 72,35, Reynoldsovo číslo má rozsah od 4151 do 18841.

Z grafu (obr. 7.6) je patrné, že Reynoldsovo číslo nabývá za všech okolností hodnot turbulentního proudění.

Grafické závislosti pro plastový ventil - jsou uvedeny v příloze. Měření proběhlo obdobně.

Grafické závislosti pro kovový ventil - jsou uvedeny v příloze. Měření proběhlo obdobně.

7.2 Výpočet součinitele místních ztrát a Reynoldsova čísla pro hodnoty naměřené digitálním průtokoměrem

Obecný postup výpočtu:

a) Na vyhodnocovacím zařízení jsem odečetl velikost tlakové ztráty $\Delta p_1 = p_1 - p_2$ měřeného prvku a na digitálním průtokoměru (obr. 5.3) jsem odečetl velikost průtoku. Následně jsem tyto hodnoty zapsal do tabulky.

b) Přepočet naměřených hodnot průtoku z $[\text{dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}]$ na $[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$

c) Velikost střední rychlosti proudění vzduchu v digitálním průtokoměru $v_{s,p}$ $[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$ dostaneme z rovnice:

$$v_{s,p} = \frac{4 \cdot Q_{v-p}}{\pi \cdot d_p^2}$$

d) Součinitel místní ztráty měřeného prvku ξ [-] vypočítáme ze vztahu:

$$\xi = \frac{2 \cdot \Delta p_1}{\rho \cdot v_{s,p}^2}$$

e) Reynoldsovo číslo Re [-] získáme ze vztahu:

$$Re = \frac{v_{s,p} \cdot d_p}{\nu}$$

Ukázka výpočtu prvního řádku z tabulky Tab. 7.2 pro kovový ventil (plně otevřen) a digitální průtokoměr (trať obr. 4.5)

$$Q_{v-p} = \frac{31}{60000} = 0,00052 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$v_{s,p} = \frac{4 \cdot Q_{v-p}}{\pi \cdot d_p^2} = \frac{4 \cdot 0,00052}{\pi \cdot 0,0157^2} = 2,669 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\xi = \frac{2 \cdot \Delta p_1}{\rho \cdot v_{s,p}^2} = \frac{2 \cdot 37}{1,188 \cdot 2,669^2} = 8,745 \text{ [-]}$$

$$\text{Re} = \frac{v_{s,p} \cdot d_p}{\nu} = \frac{2,669 \cdot 0,0157}{1,532 \cdot 10^{-5}} = 2735 \text{ [-]}$$

Tab. 7.2 Tabulka naměřených a vypočtených hodnot

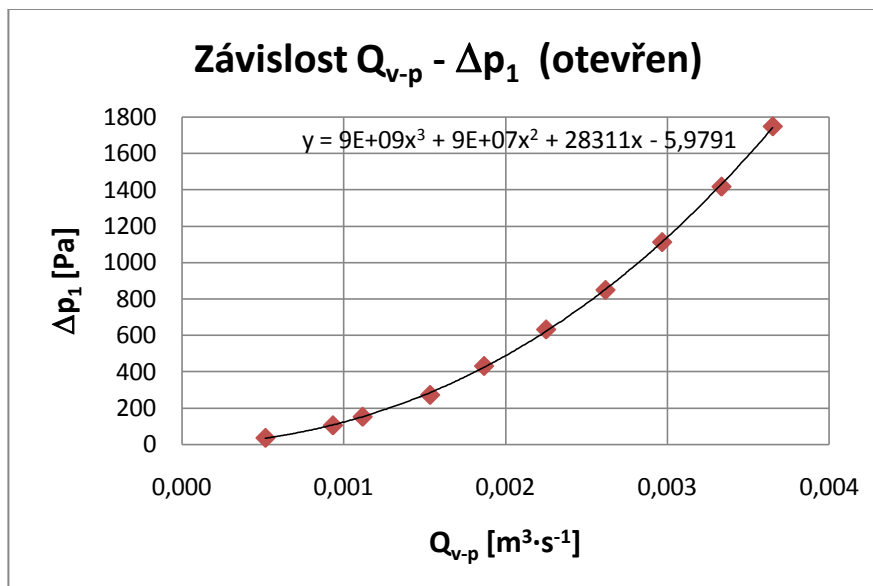
	Naměřené hodnoty			Vypočtené hodnoty			
Měření č.	f [Hz]	Δp_1 [Pa]	Q_{v-p} [dm ³ ·min ⁻¹]	Q_{v-p} [m ³ ·s ⁻¹]	$v_{s,p}$ [m·s ⁻¹]	ξ [-]	Re [-]
1	15	37	31	0,00052	2,669	8,745	2735
2	25	106	56	0,00093	4,821	7,678	4941
3	30	153	67	0,00112	5,768	7,742	5911
:	:	:	:	:	:	:	:

Tab. 7.2 zobrazuje hodnoty pouze pro první tři měření. Kompletní tabulky naměřených a vypočtených hodnot včetně k nim vytvořených grafických závislostí jsou uvedeny v příloze.

Grafy vyobrazují tyto závislosti:

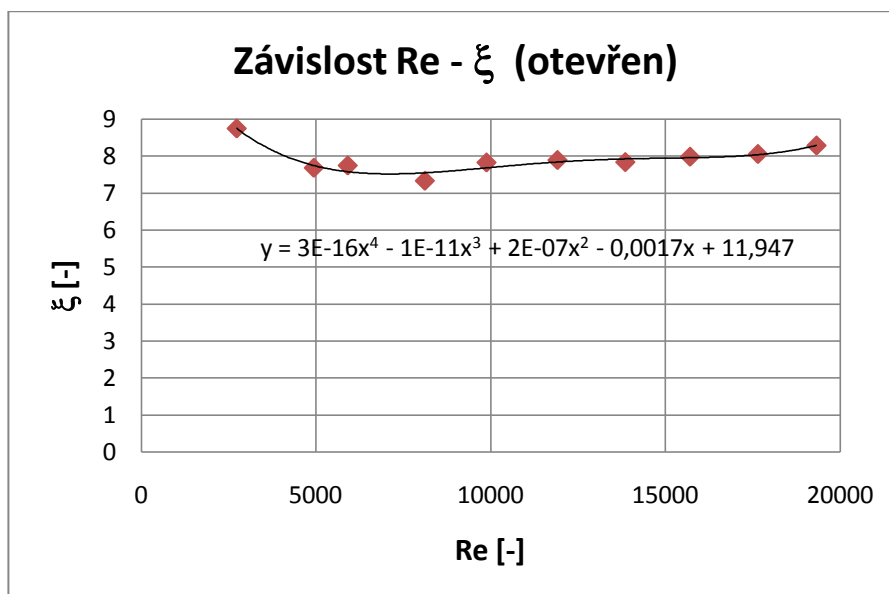
- tlakový spád měřeného prvku na průtoku ($Q_{v-p} - \Delta p_1$)
- součinitel místní ztráty na Reynoldsově čísle ($\text{Re} - \xi$)

Grafické závislosti pro kovový ventil – poloha plně otevřeno



Obr. 7.7 Závislost tlakové ztráty prvku na průtoku

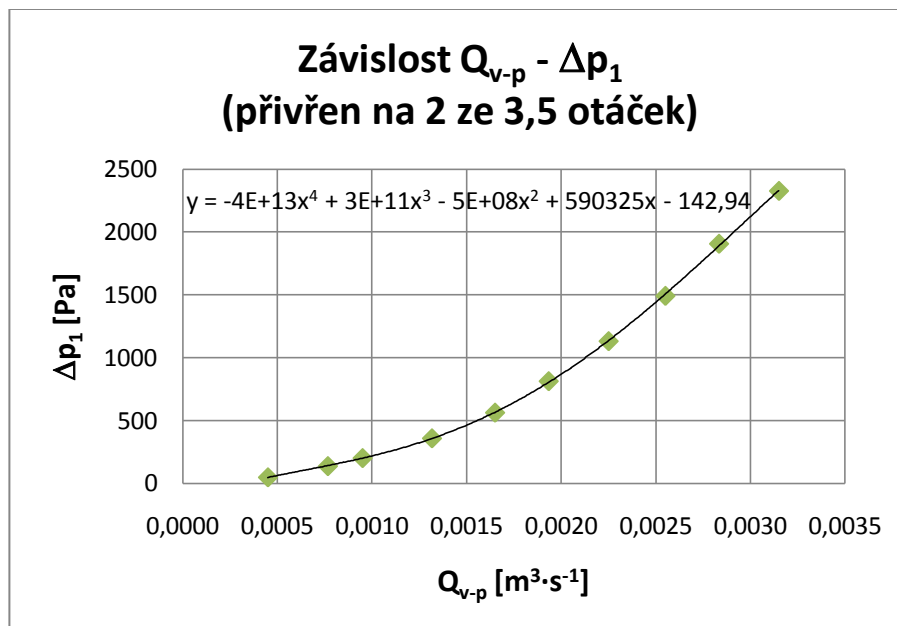
Obr. 7.7 zobrazuje závislost tlakové difference Δp_1 naměřené na kovovém ventilu (obr. 5.10) v poloze otevřen na průtoku vzduchu měřicí tratí. Se zvyšujícím se průtokem narůstá tlaková ztráta od 37 Pa do 1749 Pa. Průtok má rozpětí $0,00052 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ až $0,00365 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.



Obr. 7.8 Závislost součinitele místní ztráty na Reynoldsově čísle

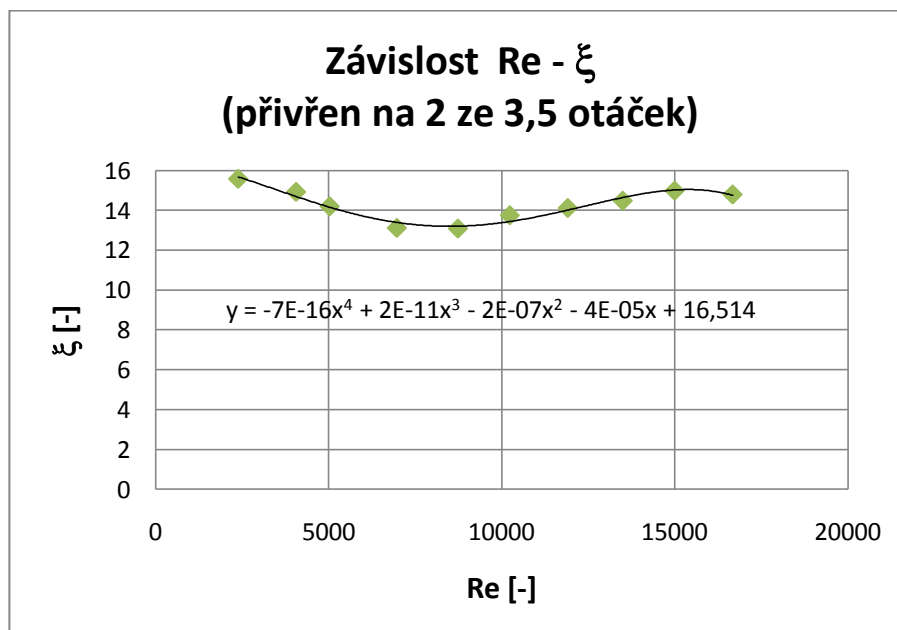
Obr. 7.8 zobrazuje závislost součinitele místní ztráty ξ naměřené na kovovém ventilu (obr. 5.10) v poloze otevřen na Reynoldsově čísle. Součinitel místní ztráty se pohybuje v rozmezí hodnot 7,326 až 8,745 a je jen málo ovlivněn Reynoldsovým číslem, které narůstá od 2735 do 19322.

Grafické závislosti pro kovový ventil – poloha přivřeno na 2 ze 3,5 otáčky



Obr. 7.9 Závislost tlakové ztráty prvku na průtoku

Obr. 7.9 zobrazuje závislost tlakové difference Δp_1 naměřené na kovovém ventilu (obr. 5.10) v poloze přivřeno na 2 ze 3,5 otáček na průtoku vzduchu měřicí tratí. Se zvyšujícím se průtokem narůstá tlaková ztráta od 50 Pa do 2326 Pa. Průtok má rozpětí $0,00045 m^3 \cdot s^{-1}$ až $0,00315 m^3 \cdot s^{-1}$.

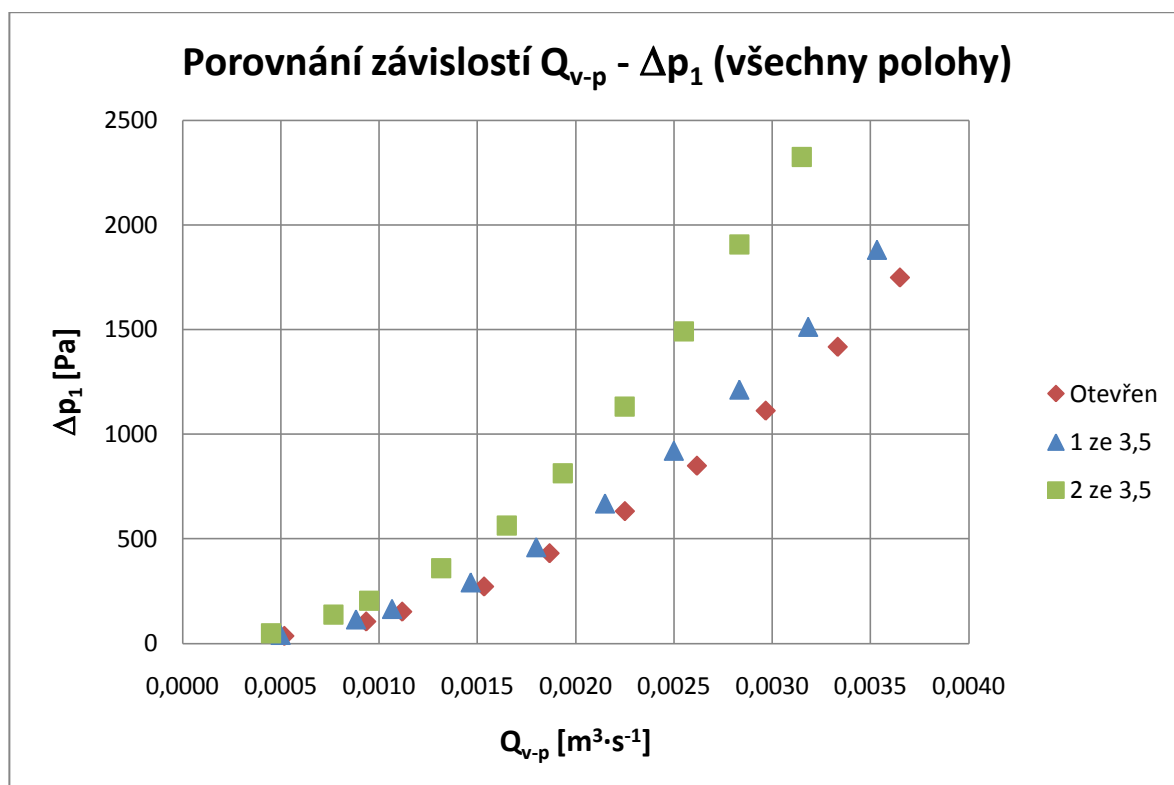


Obr. 7.10 Závislost součinitele místní ztráty na Reynoldsově čísle

Obr. 7.10 zobrazuje závislost součinitele místní ztráty ξ naměřené na kovovém ventilu (obr. 5.10) v poloze přivřeno na 2 ze 3,5 otáček na Reynoldsově čísle. Součinitel místní ztráty

se pohybuje v rozmezí hodnot 13,071 až 15,579 , Reynoldsovo číslo má rozsah od 2735 do 19322. Součinitel místní ztráty je nejmenší v rozmezí hodnot Re. č. od 6970 do 8734.

Porovnání grafických závislostí měřených poloh kovového ventilu



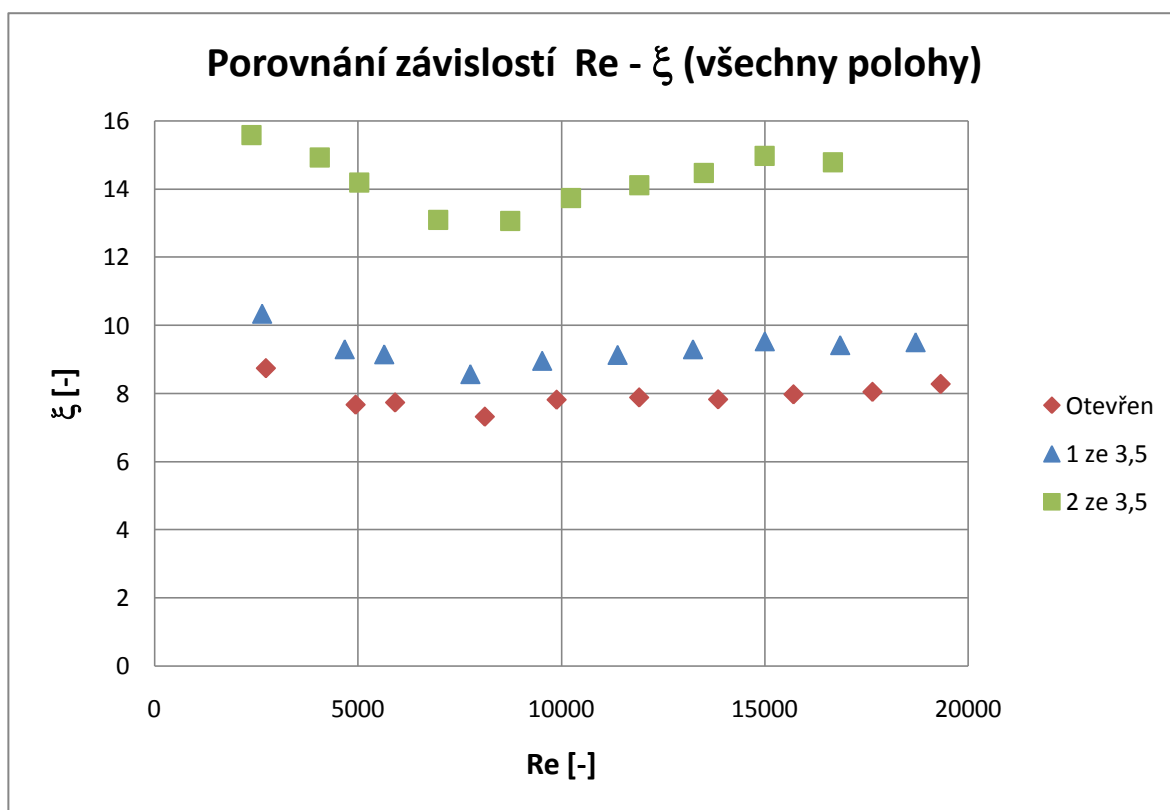
Obr. 7.11 Porovnání závislostí tlakové ztráty prvku na průtoku

Obr. 7.11 zobrazuje závislosti tlakových ztrát Δp_1 kovového ventilu (obr. 5.10) na průtoku vzduchu měřicí tratí naměřené v polohách otevřen a přivřen na 2 a 3 ze 3,5 otáček. Se zvyšujícím se průtokem narůstají tlakové ztráty a to v závislosti na aktuální poloze kohoutu.

V poloze otevřeno tlaková ztráta narůstá od 37 Pa do 1749 Pa, objemový průtok má rozsah od $0,00052 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ do $0,00365 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

V poloze přivřen na 1 ze 3,5 otáček tlaková ztráta narůstá od 41 Pa do 1881 Pa, objemový průtok má rozsah od $0,0005 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ do $0,00353 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

V poloze přivřen na 2 ze 3,5 otáček tlaková ztráta narůstá od 50 Pa do 2326 Pa, objemový průtok má rozsah od $0,00045 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ do $0,00315 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.



Obr. 7.12 Porovnání závislostí součinitele místní ztráty na Reynoldsově čísle

Obr. 7.12 zobrazuje závislosti součinitelů místních ztrát ξ kovového ventilu (obr. 5.10) na Reynoldsově čísle naměřené v polohách otevřen a přivřen na 2 a 3 ze 3,5 otáček.

V poloze otevřen se součinitel místní ztráty pohybuje v rozmezí hodnot 7,326 až 8,745 , Reynoldsovo číslo má rozsah od 2735 do 19322.

V poloze přivřen na 1 ze 3,5 otáček se součinitel místní ztráty pohybuje v rozmezí hodnot 8,565 až 10,348 , Reynoldsovo číslo má rozsah od 2647 do 18704.

V poloze přivřen na 2 ze 3,5 otáček se součinitel místní ztráty pohybuje v rozmezí hodnot 13,071 až 15,579 , Reynoldsovo číslo má rozsah od 2382 do 16675.

Z grafu (obr. 7.12) je patrné, že Reynoldsovo číslo nabývá za všech okolností hodnot turbulentního proudění. Dále lze pozorovat, že souč. místních ztrát jsou nejmenší, když se Re. č. pohybuje okolo hodnoty 8000.

Grafické závislosti pro plastový ventil - jsou uvedeny v příloze. Měření proběhlo obdobně.

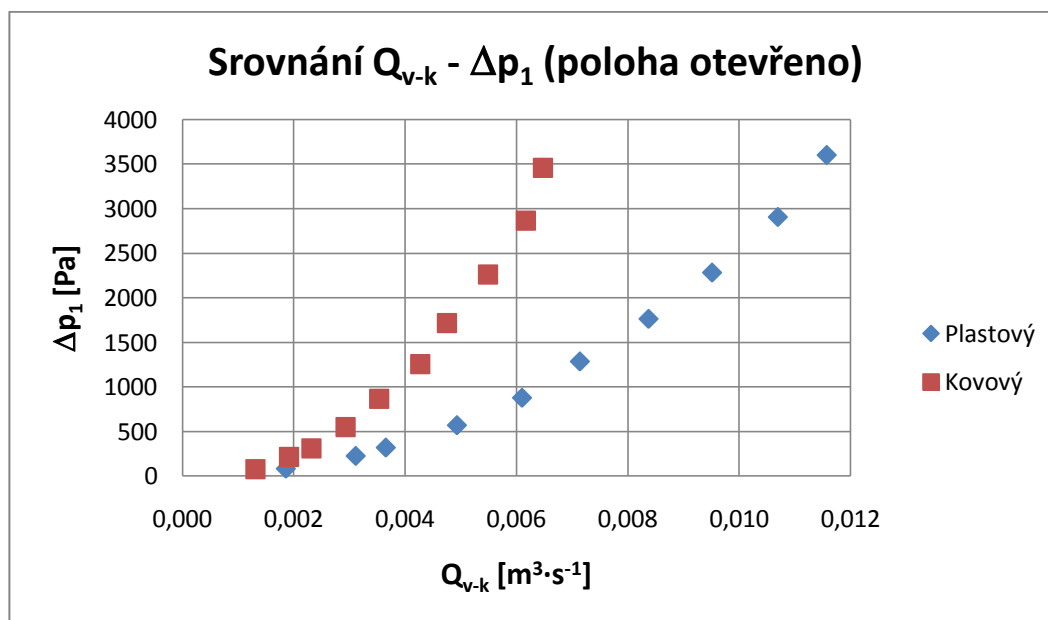
Grafické závislosti pro kovový ventil - jsou uvedeny v příloze. Měření proběhlo obdobně.

7.3 Porovnání výsledků měření průtoku

Porovnání jsem provedl na plastovém ventilu (obr. 5.9) a kovovém ventilu (obr. 5.10)

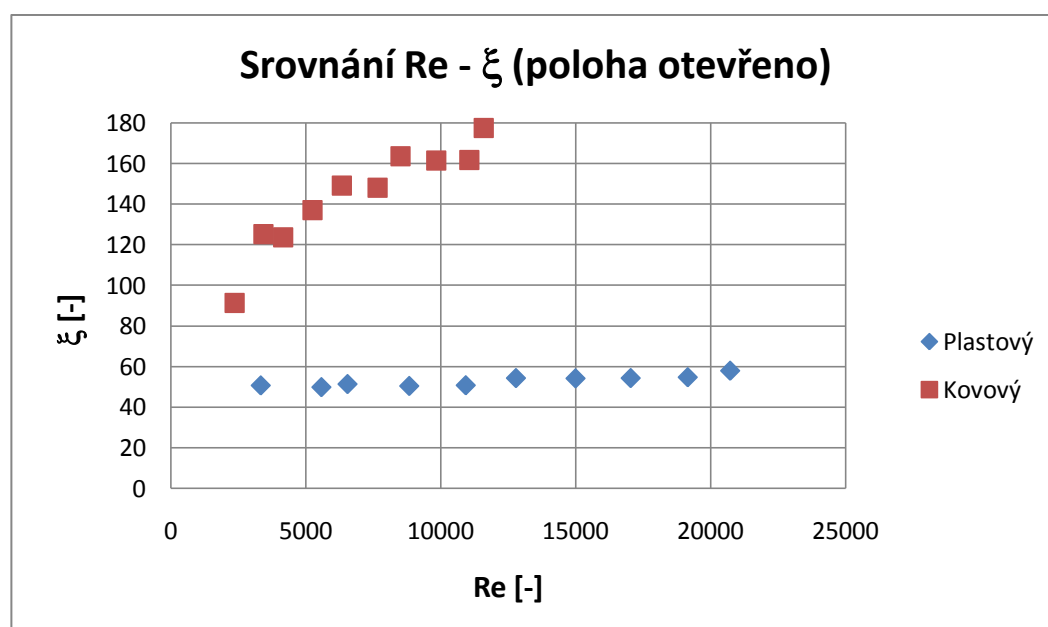
a) Srovnání obou ventilů při měření kolenovým průtokoměrem

Grafické závislosti obou ventilů – poloha plně otevřeno



Obr. 7.13 Závislost tlakové ztráty prvku na průtoku

Na obr. 7.13 oba ventily dosahují v závislosti na přivření podobných hodnot tlakové ztráty. Plastový ventil však dosahuje bezmála dvojnásobného průtoku při podobné tlakové ztrátě. To je dáno rozdílem světlostí obou ventilů, kdy kovový má světlost cca 19 mm (3/4") zatímco plastový (obr. 5.9) má světlost 32 mm.

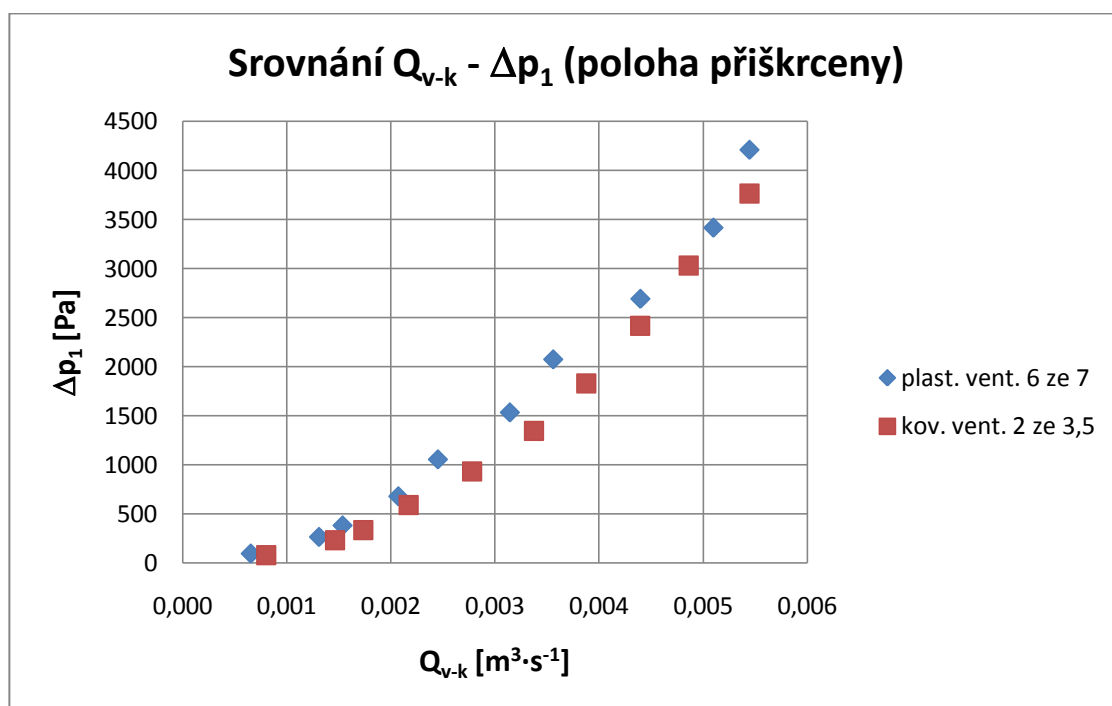


Obr. 7.14 Závislost součinitele místní ztráty na Reynoldsově čísle

Na obr. 7.14 jsou porovnány oba ventily z hlediska závislosti souč. místní ztráty na Reynoldsově čísle. Plastový ventil vykazuje v celém rozsahu proměřovaných průtoků jen malou závislost místní ztráty na Reynoldsově čísle. Součinitel místní ztráty se pohybuje v rozmezí hodnot 49,778 až 57,833 , Reynoldsovo číslo má rozsah od 3321 do 20723.

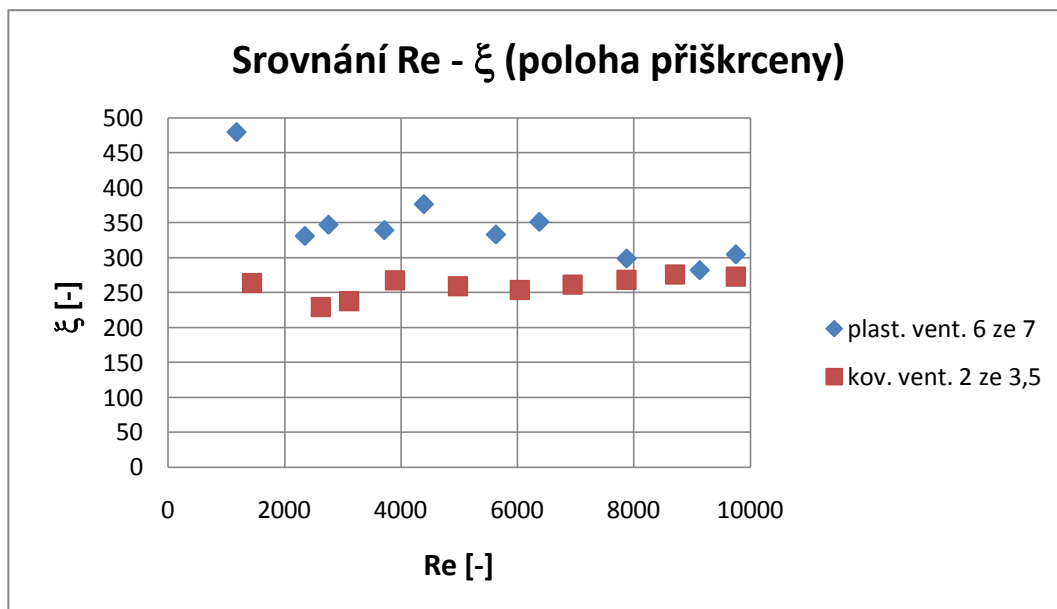
Závislost místní ztráty na Reynoldsově čísle je u kovového ventilu spíše skokově narůstajícího charakteru. Součinitel místní ztráty se pohybuje v rozmezí hodnot 91,25 až 177,385 , Reynoldsovo číslo má rozsah od 2348 do 11594. Maximální hodnoty Re. č. opět odrážejí rozdílné světlosti obou ventilů. Menší světlost kovového ventilu se také projevila dvojnásobně až trojnásobně větším součinitelem místních ztrát.

Grafické závislosti obou ventilů – přiškrceny do poloh kdy mají oba podobný průtok



Obr. 7.15 Závislost tlakové ztráty prvku na průtoku

Obr. 7.15 zobrazuje závislosti tlakové ztráty prvků na průtoku v případě přiškrcení ventilů do polohy, kdy mají oba velmi podobné rozsahy průtoku. Charakteristiky jsou si velmi podobné jak svým průběhem, tak i podobnými hodnotami průtoku a tlakové ztráty. Zde se již rozdíly vlivem odlišných světlostí projevují minimálně.



Obr. 7.16 Závislost součinitele místní ztráty na Reynoldsově čísle

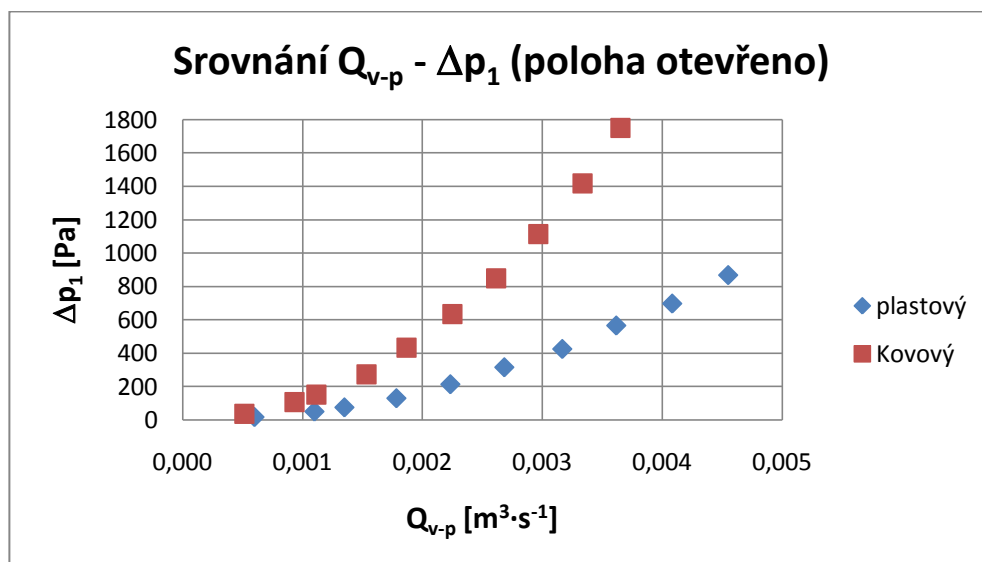
Obr. 7.16 zobrazuje závislosti součinitele místní ztráty na Reynoldsově čísle v případě přiškrcení ventilů do polohy, kdy mají oba velmi podobné rozsahy průtoku.

Kovový ventil v daném případě nevykazuje přílišnou závislost místní ztráty na Reynoldsově čísle. Součinitel místní ztráty se pohybuje v rozmezí hodnot 229 až 275,445 , Reynoldsovo číslo má rozsah od 1438 do 9753.

Velikost součinitele místní ztráty nabývá u plastového ventilu většího rozsahu hodnot a také má většinou větší velikost ve srovnání s kovovým ventilem. Součinitel místní ztráty se pohybuje v rozmezí hodnot 282,149 až 480 , Reynoldsovo číslo má rozsah od 1174 do 9753

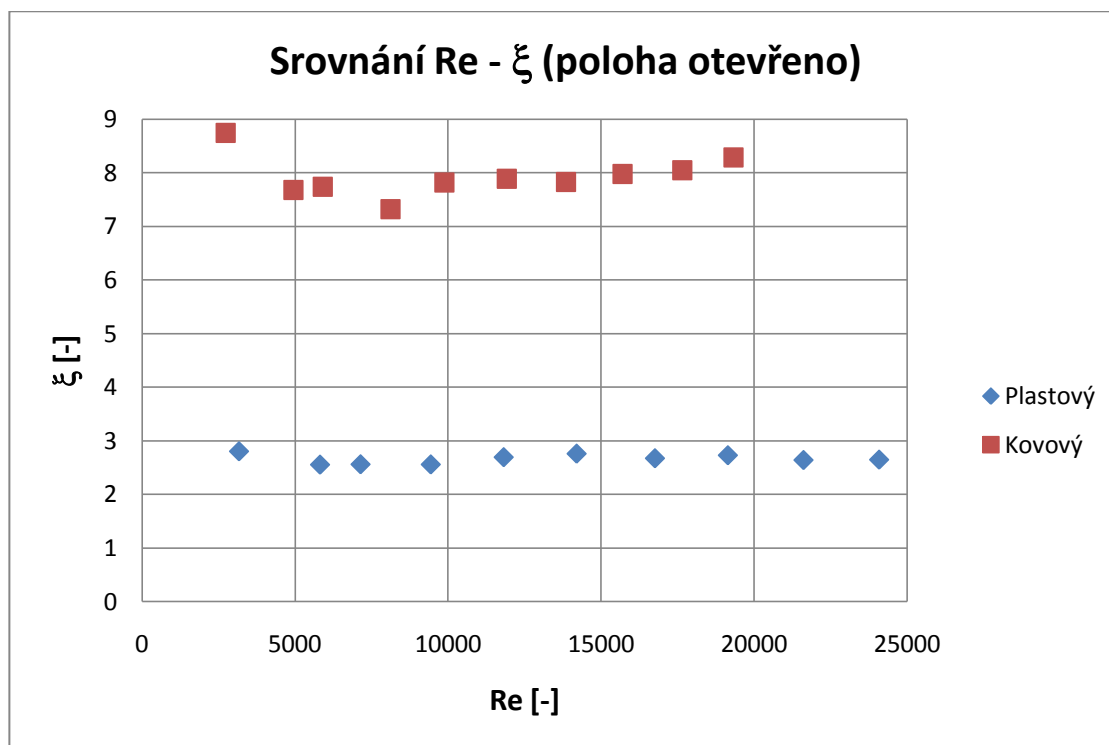
b) Srovnání obou ventilů při měření digitálním průtokoměrem

Grafické závislosti obou ventilů – poloha plně otevřeno



Obr. 7.17 Závislost tlakové ztráty prvku na průtoku

Obr. 7.17 zobrazuje závislosti tlakové ztráty prvků na průtoku v případě, kdy jsou oba ventily plně otevřeny. Plastový ventil dosahuje vyšších hodnot průtoku, kdy v maximum je tento rozdíl cca 20%. Tlaková ztráta na prvku je u kovového ventilu i více než dvojnásobná, oproti plastovému při podobném průtoku.

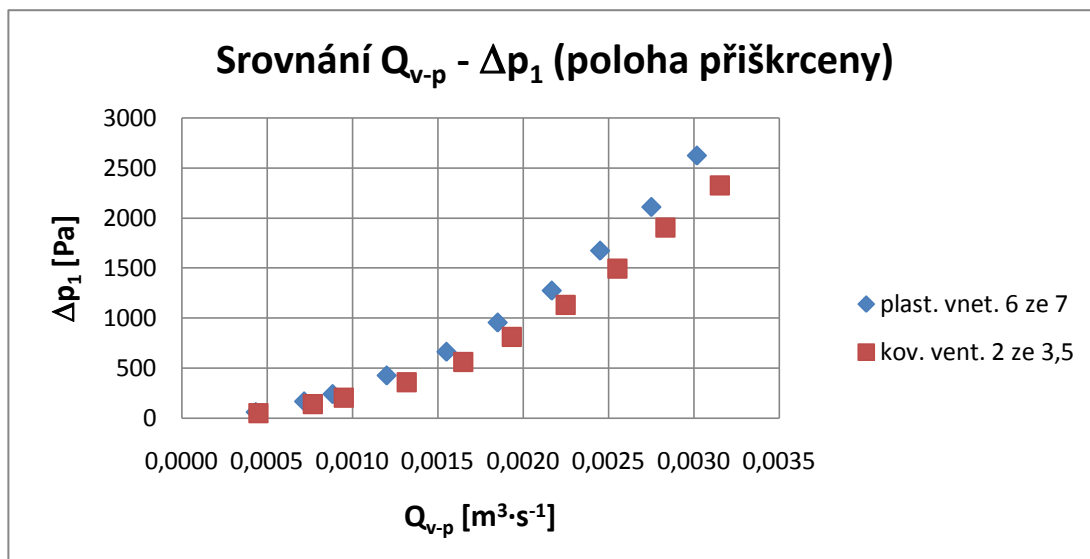


Obr. 7.18 Závislost součinitele místní ztráty na Reynoldsově čísle

Na obr. 7.18 jsou porovnány oba ventily z hlediska závislosti souč. místní ztráty na Reynoldsově čísle. Plastový ventil vykazuje v celém rozsahu proměřovaných průtoků jen minimální závislost místní ztráty na Re. čísle. Součinitel místní ztráty se pohybuje v rozmezí hodnot 2,555 až 2,804 , Reynoldsovo číslo má rozsah od 3176 do 24086.

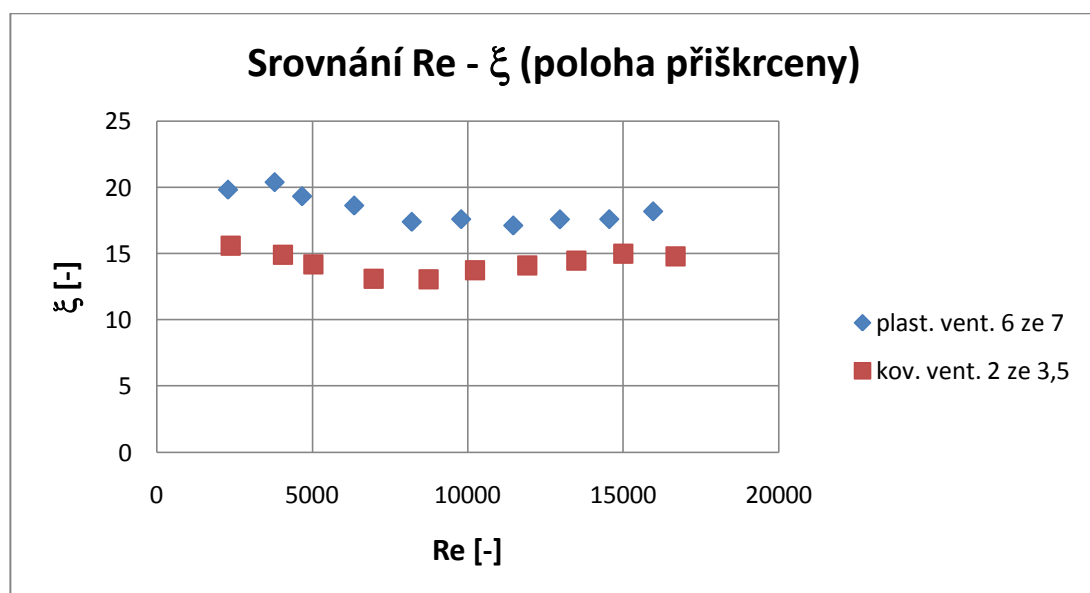
Kovový ventil v daném případě nevykazuje přílišnou závislost místní ztráty na Reynoldsově čísle. Součinitel místní ztráty se pohybuje v rozmezí hodnot 7,326 až 8,745 , Reynoldsovo číslo má rozsah od 2735 do 19322. Zde již není maximální dosahovaná hodnota Re. č. natolik ovlivněna rozdílnými světlostmi obou ventilů, což je patrně způsobeno použitým digitálním průtokoměrem (obr. 5.3), jehož světlost je 15,7 mm a sám tak tvoří výrazný odpor proudícímu vzduchu v celé trati a tím upravuje rozložení jednotlivých místních ztrát na všech prvcích měřicí tratě.

Grafické závislosti obou ventilů – přiškrnceny do poloh kdy mají oba podobný průtok



Obr. 7.19 Závislost tlakové ztráty prvku na průtoku

Obr. 7.19 zobrazuje závislosti tlakové ztráty prvků na průtoku v případě přiškrcení ventilů do polohy, kdy mají oba velmi podobné rozsahy průtoku. Charakteristiky jsou si velmi podobné, jak svým průběhem, tak i podobnými hodnotami průtoku a tlakové ztráty. Nejvyšší hodnoty průtoků zobrazují větší tlakové spády na plastovém ventilu oproti kovovému.



Obr. 7.20 Závislost součinitele místní ztráty na Reynoldsově čísle

Na obr. 7.20 jsou porovnány oba ventily z hlediska závislosti souč. místní ztráty na Reynoldsově čísle. Plastový ventil nevykazuje přílišnou závislost místní ztráty na Re . čísle. Součinitel místní ztráty se pohybuje v rozmezí hodnot 17,109 až 20,392 , Reynoldsovo číslo má rozsah od 2294 do 15969.

Kovový ventil v daném případě také nevykazuje přílišnou závislost místní ztráty na Re . čísle. Součinitel místní ztráty se pohybuje v rozmezí hodnot 13,071 až 15,579 , Reynoldsovo číslo má rozsah od 2382 do 16675. Průběhy pro plastový i kovový ventil mají podobný tvar.

8 Závěr

Cílem této práce bylo experimentální stanovení charakteristiky a tedy součinitelů místních ztrát různých ventilů na vzduchové trati. Všechna tato měření jsem realizoval na měřicích tratích sestavených ve školní laboratoři E306.

Teoretická část této práce se v první kapitole zabývá teorií místních ztrát a způsobem definování a stanovování. Druhá kapitola je zaměřena na měřidla a měření tlaku obecně. Obě tyto kapitoly jsou stěžejní z hlediska následné praktické části zadané bakalářské práce. Na tyto kapitoly navazuje problematika zabývající se měřením průtoku a rychlostmi proudění skutečných tekutin. I tato kapitola popisuje základní typy měřidel, kterými jsou clonové měřidlo a především pak kolenový průtokoměr, který byl spolu s digitálním průtokoměrem použit v sestavených experimentálních měřicích tratích k vyhodnocení průtočného množství.

Praktická část se zabývá návrhem samotných experimentálních měřicích tratí včetně popisu použitých měřicích zařízení a měřených prvků (plastový kohout, plastový ventil, kovový ventil). Měření probíhalo za použití dvou odlišných metod vyhodnocení průtoku. Byly sestaveny dvě základní tratě, u kterých byly nahrazovány jednotlivé měřené prvky. První trať používala ke stanovení průtoku a rychlosti proudění vzduchu kolenové měřidlo průtoku, v druhé variantě byl použit digitální průtokoměr. Obě tyto tratě používaly jako zdroj vzduchu ventilátor o stejných parametrech s elektromotorem, frekvenčním měničem a výchozím potrubím o světlosti 46 mm. Dále ke snímání tlaku byly použity snímače diferenčního tlaku s vyhodnocovacím zařízením Almemo. Stanovení součinitele místních ztrát bylo provedeno na vybraných prvcích v různých polohách na obou měřicích tratích.

Měření pomocí digitálního průtokoměru přineslo všeobecně menší rozsah součinitele místních ztrát ($0,166 \div 29,252$) na měřených prvcích (plastový kohout, plastový ventil, kovový ventil), nižší hodnoty tlakových ztrát a také menší průtoky vzduchu měřicí tratí (max. $0,00523 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) v důsledku menší světlosti průtokoměru. Redukce průměru potrubí na světlost průtokoměru tvořilo odpor proudícímu vzduchu a ovlivnilo tím tlakové poměry v celé měřicí trati.

Měření kolenovým průtokoměrem naopak zaznamenalo větší rozsah součinitele místních ztrát ($2,5 \div 544,875$) na měřených prvcích (plastový kohout, plastový ventil, kovový ventil), vyšší hodnoty tlakových ztrát a také větší průtoky vzduchu měřicí tratí (max. $0,02427 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) v důsledku větší světlosti průtokoměru. Kolenový průtokoměr klade v experimentální trati menší odpor proudícímu vzduchu než digitální průtokoměr.

Vzájemné porovnání charakteristik jednotlivých ventilů při použití obou metod měření a vyhodnocení průtoku je do značné míry ovlivněno rozdílnými rozsahy průtoku, jak je popsáno v předchozích odstavcích.

V samotném závěru (kap. 7.3) jsem porovnal charakteristiky kovového a plastového ventilu, a to vždy při shodném způsobu měření průtoku vzduchu experimentální trati (digitálním nebo kolenovým průtokoměrem). Obě metody měření průtoku ukázaly rozdíly v rozsahu průtoku v případě, kdy jsou ventily plně otevřeny (obr. 7.13 a obr. 7.17). Tento závěr je dán rozdílnými světlostmi těchto ventilů. Přivřením ventilů na obdobné hodnoty průtoku a tedy velikosti průtočné plochy bylo možno pozorovat téměř shodné charakteristiky obou ventilů (obr. 7.15, obr. 7.16 a obr. 7.19, obr. 7.20).

9 Seznam použité literatury

- [1] HOLEČEK, O.; SCHREIBEROVÁ, L. *Ztráty tlaku při proudění tekutin v přímém potrubí a v místních odporech* [online]. [cit. 2010-11-3].
<<http://www.vscht.cz/uchi/ped/labchi/H.pdf>>
- [2] SCHWARZER, J.; ZMRHAL, V. *Stanovení součinitelů místních ztrát s využitím CFD* [online]. [cit. 2010-11-12].
<http://www.fsid.cvut.cz/~zmrhavla/Publikace/Schwarzer_Zmrhal_KaV2010.pdf>
- [3] MIKAN, J. *Měření plynů*. 1. vyd. Říčany u Prahy : GAS s.r.o., 2003. 386 s.
ISBN 80-7328-053-1.
- [4] KOZUBKOVÁ, M.; KOLEKTIV. *Mechanika tekutin - návody pro laboratorní měření*.
1. vyd. Ostrava : VŠB–TU Ostrava, 2007. 113 s.
- [5] www.energoekonom.cz
- [6] www.ifm.com
- [7] www.fv-plast.cz
- [8] DRÁBKOVÁ, S.; KOLEKTIV. *Mechanika tekutin*. 1. vyd. Ostrava : VŠB-TU
Ostrava, 2007. 257 s. ISBN 978-80-248-1508-4
- [9] JANALÍK, J. *Měření tekutinových mechanismů*. 1. vyd. Ostrava : VŠB-TU Ostrava,
1995. 155 s.
- [10] NOSKIEVIČ, J., aj. *Mechanika tekutin. Příručka pro laboratorní cvičení*. 1.vyd.
Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 1987. 152 s. ISBN 80-03-00308-3.

10 Seznam příloh

Příloha A – Plastový ventil - měřen digitálním průtokoměrem (tabulky a grafy)

Příloha B – Plastový kohout - měřen digitálním průtokoměrem (tabulky a grafy)

Příloha C – Kovový ventil - měřen digitálním průtokoměrem (tabulky a grafy)

Příloha D – Plastový ventil - měřen kolenovým průtokoměrem (tabulky a grafy)

Příloha E – Plastový kohout - měřen kolenovým průtokoměrem (tabulky a grafy)

Příloha F – Kovový ventil - měřen kolenovým průtokoměrem (tabulky a grafy)

Příloha A Plastový ventil - měření digitálním průtokoměrem

1.1 Plastový ventil (plně otevřen)

Měření č.	Naměřené hodnoty			Vypočtené hodnoty			
	f [Hz]	Δp_1 [Pa]	Q_{v-p} [dm ³ ·min ⁻¹]	Q_{v-p} [m ³ ·s ⁻¹]	$v_{s,p}$ [m·s ⁻¹]	ξ [-]	Re [-]
1	15	16	36	0,00060	3,099	2,804	3176
2	25	49	66	0,00110	5,682	2,555	5823
3	30	74	81	0,00135	6,973	2,562	7146
4	40	129	107	0,00178	9,212	2,559	9440
5	50	213	134	0,00223	11,536	2,694	11822
6	60	315	161	0,00268	13,861	2,760	14205
7	70	425	190	0,00317	16,357	2,674	16763
8	80	566	217	0,00362	18,682	2,730	19145
9	90	698	245	0,00408	21,092	2,641	21616
10	100	869	273	0,00455	23,503	2,648	24086

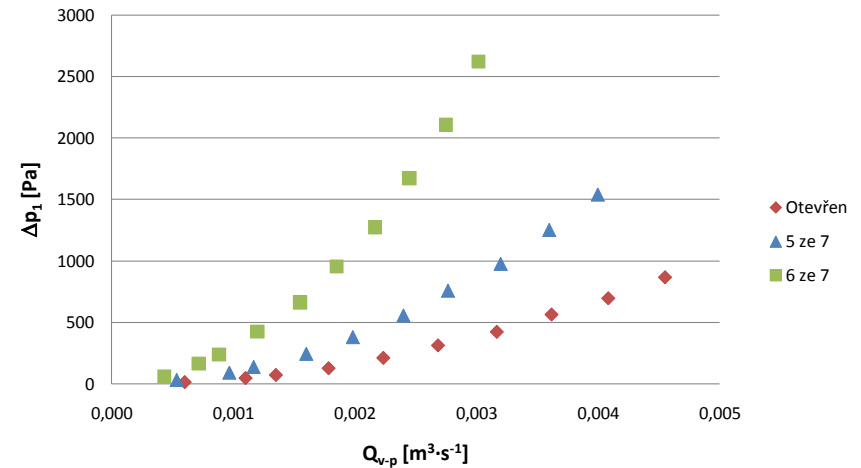
1.2 Plastový ventil (přivřen na 5 ze 7 otáček)

Měření č.	Naměřené hodnoty			Vypočtené hodnoty			
	f [Hz]	Δp_1 [Pa]	Q_{v-p} [dm ³ ·min ⁻¹]	Q_{v-p} [m ³ ·s ⁻¹]	$v_{s,p}$ [m·s ⁻¹]	ξ [-]	Re [-]
1	15	32	32	0,00053	2,755	7,098	2823
2	25	92	58	0,00097	4,993	6,212	5117
3	30	138	70	0,00117	6,026	6,397	6176
4	40	245	96	0,00160	8,265	6,038	8470
5	50	381	119	0,00198	10,245	6,111	10499
6	60	557	144	0,00240	12,397	6,101	12705
7	70	759	166	0,00277	14,291	6,256	14646
8	80	977	192	0,00320	16,530	6,020	16940
9	90	1253	216	0,00360	18,596	6,100	19057
10	100	1541	240	0,00400	20,662	6,077	21174

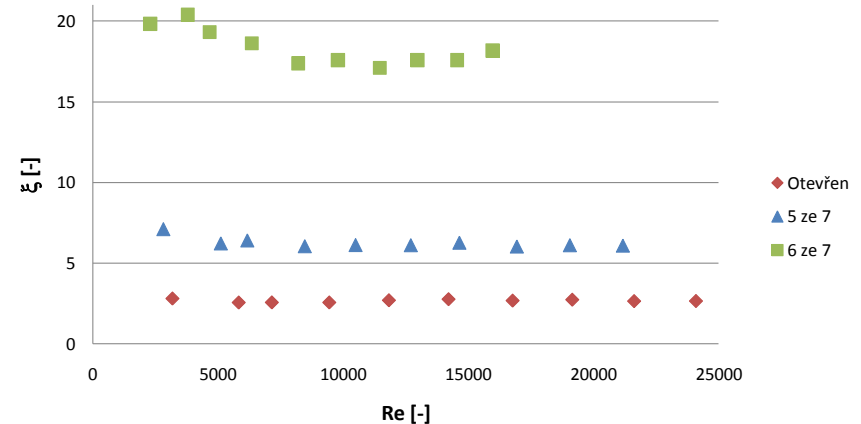
1.3 Plastový ventil (přivřen na 6 ze 7 otáček)

Měření č.	Naměřené hodnoty			Vypočtené hodnoty			
	f [Hz]	Δp_1 [Pa]	Q_{v-p} [dm ³ ·min ⁻¹]	Q_{v-p} [m ³ ·s ⁻¹]	$v_{s,p}$ [m·s ⁻¹]	ξ [-]	Re [-]
1	15	59	26	0,00043	2,238	19,824	2294
2	25	166	43	0,00072	3,702	20,392	3794
3	30	239	53	0,00088	4,563	19,326	4676
4	40	425	72	0,00120	6,199	18,622	6352
5	50	662	93	0,00155	8,006	17,385	8205
6	60	954	111	0,00185	9,556	17,587	9793
7	70	1273	130	0,00217	11,192	17,109	11469
8	80	1672	147	0,00245	12,655	17,575	12969
9	90	2108	165	0,00275	14,205	17,587	14557
10	100	2622	181	0,00302	15,583	18,179	15969

Porovnání závislostí Q_{v-p} - Δp_1 (všechny polohy)



Porovnání závislostí Re - ξ (všechny polohy)



Příloha B Plastový kohout - měření digitálním průtokoměrem

2.1 Plastový kohout (plně otevřen 0°)

Měření č.	Naměřené hodnoty			Vypočtené hodnoty			
	f [Hz]	Δp_1 [Pa]	$Q_{v,p}$ [dm ³ ·min ⁻¹]	$Q_{v,p}$ [m ³ ·s ⁻¹]	$v_{s,p}$ [m·s ⁻¹]	ξ [-]	Re [-]
1	15	4	44	0,00073	3,788	0,469	3882
2	25	10	77	0,00128	6,629	0,383	6793
3	30	11	94	0,00157	8,093	0,283	8293
4	40	13	122	0,00203	10,503	0,198	10764
5	50	18	154	0,00257	13,258	0,172	13587
6	60	25	185	0,00308	15,927	0,166	16322
7	70	39	218	0,00363	18,768	0,186	19233
8	80	47	249	0,00415	21,437	0,172	21968
9	90	64	281	0,00468	24,192	0,184	24792
10	100	72	314	0,00523	27,033	0,166	27703

2.2 Plastový kohout (přivřen na 20°)

Měření č.	Naměřené hodnoty			Vypočtené hodnoty			
	f [Hz]	Δp_1 [Pa]	$Q_{v,p}$ [dm ³ ·min ⁻¹]	$Q_{v,p}$ [m ³ ·s ⁻¹]	$v_{s,p}$ [m·s ⁻¹]	ξ [-]	Re [-]
1	15	6	42	0,00070	3,616	0,773	3706
2	25	18	74	0,00123	6,371	0,747	6529
3	30	25	90	0,00150	7,748	0,701	7940
4	40	51	116	0,00193	9,987	0,861	10234
5	50	79	148	0,00247	12,742	0,819	13058
6	60	114	177	0,00295	15,238	0,827	15616
7	70	162	208	0,00347	17,907	0,851	18351
8	80	203	238	0,00397	20,490	0,814	20998
9	90	251	269	0,00448	23,159	0,788	23733
10	100	277	300	0,00500	25,827	0,699	26468

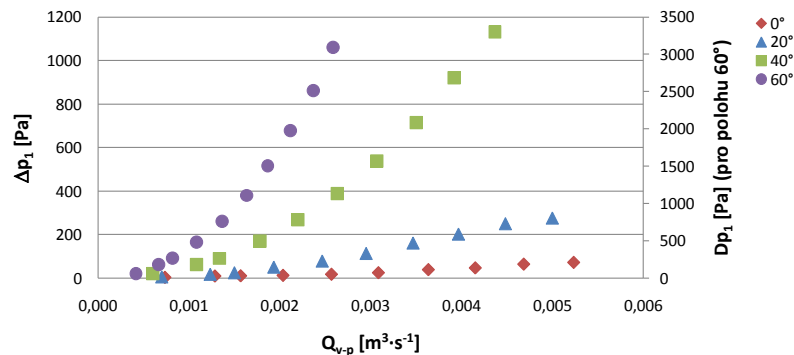
2.3 Plastový kohout (přivřen na 40°)

Měření č.	Naměřené hodnoty			Vypočtené hodnoty			
	f [Hz]	Δp_1 [Pa]	$Q_{v,p}$ [dm ³ ·min ⁻¹]	$Q_{v,p}$ [m ³ ·s ⁻¹]	$v_{s,p}$ [m·s ⁻¹]	ξ [-]	Re [-]
1	15	21	36	0,00060	3,099	3,681	3176
2	25	62	65	0,00108	5,596	3,333	5735
3	30	91	80	0,00133	6,887	3,230	7058
4	40	170	107	0,00178	9,212	3,373	9440
5	50	268	132	0,00220	11,364	3,494	11646
6	60	388	158	0,00263	13,602	3,530	13940
7	70	539	184	0,00307	15,841	3,616	16234
8	80	714	210	0,00350	18,079	3,678	18528
9	90	921	235	0,00392	20,231	3,788	20733
10	100	1132	262	0,00437	22,556	3,746	23115

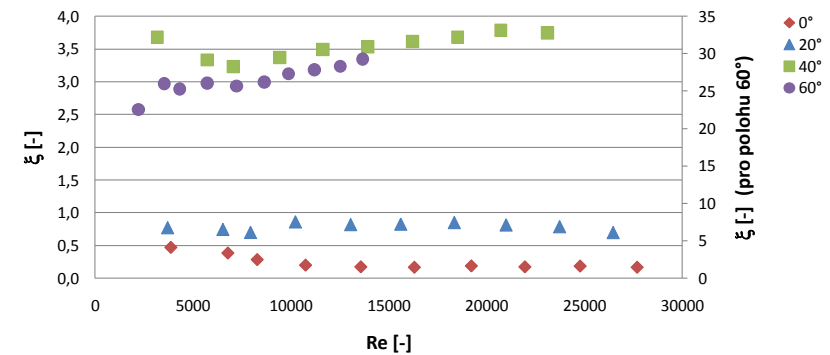
2.4 Plastový kohout (přivřen na 60°)

Měření č.	Naměřené hodnoty			Vypočtené hodnoty			
	f [Hz]	Δp_1 [Pa]	$Q_{v,p}$ [dm ³ ·min ⁻¹]	$Q_{v,p}$ [m ³ ·s ⁻¹]	$v_{s,p}$ [m·s ⁻¹]	ξ [-]	Re [-]
1	15	62	25	0,00042	2,152	22,532	2206
2	25	183	40	0,00067	3,444	25,979	3529
3	30	267	49	0,00082	4,218	25,259	4323
4	40	485	65	0,00108	5,596	26,074	5735
5	50	760	82	0,00137	7,059	25,673	7235
6	60	1109	98	0,00163	8,437	26,229	8646
7	70	1508	112	0,00187	9,642	27,306	9881
8	80	1976	127	0,00212	10,934	27,827	11205
9	90	2514	142	0,00237	12,225	28,319	12528
10	100	3094	155	0,00258	13,344	29,252	13675

Porovnání grafů $Q_{v,p}$ - Δp_1 (pro polohy 0° - 60°)



Porovnání grafů Re - ξ (pro polohy 0° - 60°)



Příloha C Kovový ventil - měření digitálním průtokoměrem

3.1 Kovový ventil (plně otevřen)

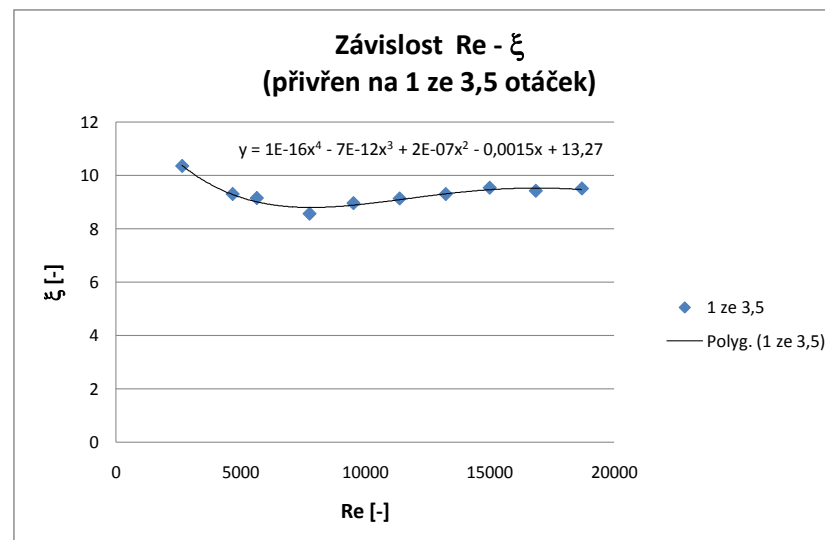
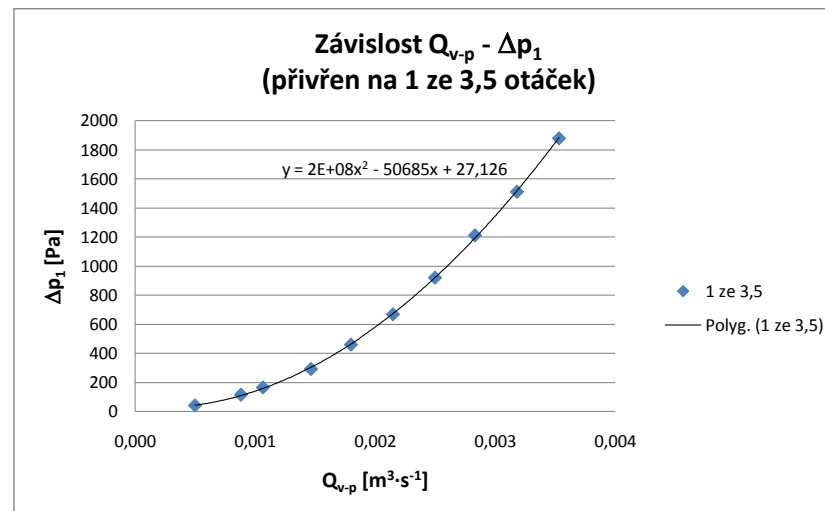
Měření č.	Naměřené hodnoty			Vypočtené hodnoty			
	f [Hz]	Δp_1 [Pa]	Q_{v-p} [dm ³ ·min ⁻¹]	Q_{v-p} [m ³ ·s ⁻¹]	$v_{s,p}$ [m·s ⁻¹]	ξ [-]	Re [-]
1	15	37	31	0,00052	2,669	8,745	2735
2	25	106	56	0,00093	4,821	7,678	4941
3	30	153	67	0,00112	5,768	7,742	5911
4	40	273	92	0,00153	7,920	7,326	8117
5	50	432	112	0,00187	9,642	7,822	9881
6	60	633	135	0,00225	11,622	7,889	11911
7	70	850	157	0,00262	13,516	7,833	13852
8	80	1113	178	0,00297	15,324	7,979	15704
9	90	1418	200	0,00333	17,218	8,052	17645
10	100	1749	219	0,00365	18,854	8,283	19322

3.2 Kovový ventil (přivřen na 1 ze 3,5 otáček)

Měření č.	Naměřené hodnoty			Vypočtené hodnoty			
	f [Hz]	Δp_1 [Pa]	Q_{v-p} [dm ³ ·min ⁻¹]	Q_{v-p} [m ³ ·s ⁻¹]	$v_{s,p}$ [m·s ⁻¹]	ξ [-]	Re [-]
1	15	41	30	0,00050	2,583	10,348	2647
2	25	115	53	0,00088	4,563	9,299	4676
3	30	165	64	0,00107	5,510	9,150	5647
4	40	292	88	0,00147	7,576	8,565	7764
5	50	460	108	0,00180	9,298	8,958	9528
6	60	669	129	0,00215	11,106	9,131	11381
7	70	921	150	0,00250	12,914	9,298	13234
8	80	1213	170	0,00283	14,636	9,534	14999
9	90	1513	191	0,00318	16,443	9,420	16851
10	100	1881	212	0,00353	18,251	9,506	18704

3.3 Kovový ventil (přivřen na 2 ze 3,5 otáček)

Měření č.	Naměřené hodnoty			Vypočtené hodnoty			
	f [Hz]	Δp_1 [Pa]	Q_{v-p} [dm ³ ·min ⁻¹]	Q_{v-p} [m ³ ·s ⁻¹]	$v_{s,p}$ [m·s ⁻¹]	ξ [-]	Re [-]
1	15	50	27	0,00045	2,324	15,579	2382
2	25	139	46	0,00077	3,960	14,921	4058
3	30	203	57	0,00095	4,907	14,192	5029
4	40	360	79	0,00132	6,801	13,102	6970
5	50	564	99	0,00165	8,523	13,071	8734
6	60	814	116	0,00193	9,987	13,741	10234
7	70	1132	135	0,00225	11,622	14,108	11911
8	80	1492	153	0,00255	13,172	14,477	13499
9	90	1906	170	0,00283	14,636	14,980	14999
10	100	2326	189	0,00315	16,271	14,790	16675



Příloha D Plastový ventil - měření kolenovým průtokoměrem

4.1 Plastový ventil (plně otevřen)

Měření č.	Naměřené hodnoty			Vypočtené hodnoty			
	f [Hz]	Δp_1 [Pa]	Δp_2 [Pa]	$v_{s,k}$ [m·s ⁻¹]	Q_{v-k} [m ³ ·s ⁻¹]	ξ [-]	Re [-]
1	15	81	1,6	1,641	0,00185	50,625	3321
2	25	224	4,5	2,752	0,00311	49,778	5569
3	30	318	6,2	3,231	0,00365	51,290	6537
4	40	569	11,3	4,362	0,00493	50,354	8826
5	50	877	17,3	5,397	0,00610	50,694	10920
6	60	1285	23,7	6,317	0,00714	54,219	12782
7	70	1763	32,6	7,408	0,00837	54,080	14991
8	80	2283	42,1	8,419	0,00951	54,228	17035
9	90	2907	53,2	9,464	0,01069	54,643	19150
10	100	3603	62,3	10,241	0,01157	57,833	20723

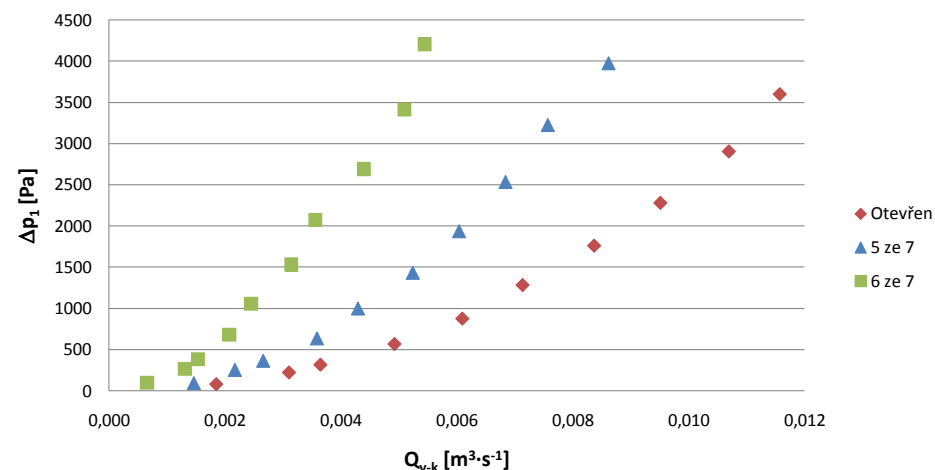
4.2 Plastový ventil (přivřen na 5 ze 7 otáček)

Měření č.	Naměřené hodnoty			Vypočtené hodnoty			
	f [Hz]	Δp_1 [Pa]	Δp_2 [Pa]	$v_{s,k}$ [m·s ⁻¹]	Q_{v-k} [m ³ ·s ⁻¹]	ξ [-]	Re [-]
1	15	90	1,0	1,297	0,00147	90,000	2625
2	25	251	2,2	1,925	0,00217	114,091	3894
3	30	362	3,3	2,357	0,00266	109,697	4769
4	40	634	6,0	3,178	0,00359	105,667	6431
5	50	997	8,6	3,805	0,00430	115,930	7699
6	60	1431	12,8	4,642	0,00524	111,797	9393
7	70	1936	17,0	5,350	0,00604	113,882	10825
8	80	2534	21,8	6,058	0,00684	116,239	12259
9	90	3226	26,7	6,704	0,00757	120,824	13566
10	100	3977	34,6	7,632	0,00862	114,942	15444

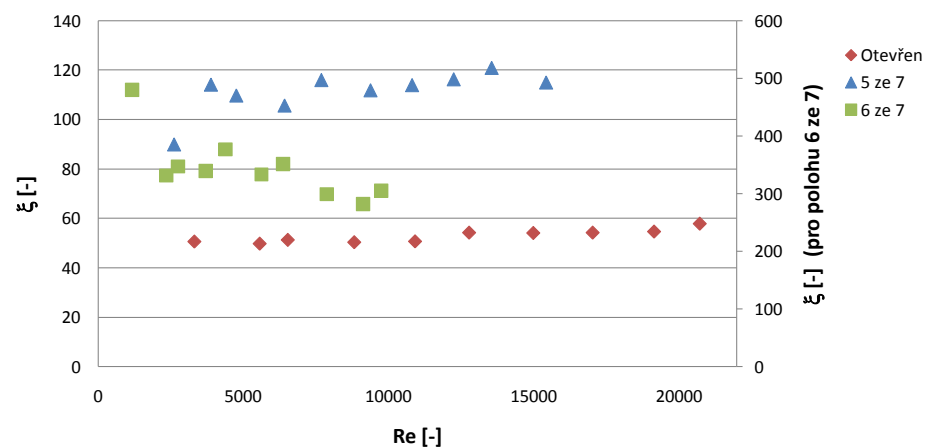
4.3 Plastový ventil (přivřen na 6 ze 7 otáček)

Měření č.	Naměřené hodnoty			Vypočtené hodnoty			
	f [Hz]	Δp_1 [Pa]	Δp_2 [Pa]	$v_{s,k}$ [m·s ⁻¹]	Q_{v-k} [m ³ ·s ⁻¹]	ξ [-]	Re [-]
1	15	96	0,2	0,580	0,00066	480,000	1174
2	25	265	0,8	1,161	0,00131	331,250	2348
3	30	382	1,1	1,361	0,00154	347,273	2754
4	40	679	2,0	1,835	0,00207	339,500	3713
5	50	1055	2,8	2,171	0,00245	376,786	4393
6	60	1533	4,6	2,783	0,00314	333,261	5631
7	70	2073	5,9	3,152	0,00356	351,356	6377
8	80	2690	9,0	3,892	0,00440	298,889	7876
9	90	3414	12,1	4,513	0,00510	282,149	9133
10	100	4207	13,8	4,820	0,00544	304,855	9753

Porovnání závislostí $Q_{v-k} - \Delta p_1$ (všechny polohy)



Porovnání závislostí Re - ξ (všechny polohy)



Příloha E Plastový kohout - měření kolenovým průtokoměrem

5.1 Plastový kohout (plně otevřen 0°)

Měření č.	Naměřené hodnoty			Vypočtené hodnoty			
	f [Hz]	Δp_1 [Pa]	Δp_2 [Pa]	$v_{s,k}$ [m·s ⁻¹]	$Q_{v,k}$ [m ³ ·s ⁻¹]	ξ [-]	Re [-]
1	15	15	6,0	3,178	0,00359	2,500	6431
2	25	43	15,5	5,108	0,00577	2,774	10337
3	30	64	21,8	6,058	0,00684	2,936	12259
4	40	110	41,1	8,318	0,00940	2,676	16832
5	50	171	58,7	9,941	0,01123	2,913	20115
6	60	244	90,6	12,350	0,01395	2,693	24990
7	70	337	122,4	14,355	0,01622	2,753	29047
8	80	443	158,4	16,330	0,01845	2,797	33044
9	90	582	216,6	19,096	0,02157	2,687	38640
10	100	704	274,2	21,485	0,02427	2,567	43475

5.2 Plastový kohout (přivřen na 20°)

Měření č.	Naměřené hodnoty			Vypočtené hodnoty			
	f [Hz]	Δp_1 [Pa]	Δp_2 [Pa]	$v_{s,k}$ [m·s ⁻¹]	$Q_{v,k}$ [m ³ ·s ⁻¹]	ξ [-]	Re [-]
1	15	51	4,5	2,752	0,00311	11,333	5569
2	25	139	11,5	4,400	0,00497	12,087	8903
3	30	201	16,0	5,190	0,00586	12,563	10502
4	40	366	26,0	6,616	0,00747	14,077	13387
5	50	580	43,3	8,538	0,00964	13,395	17276
6	60	829	53,5	9,490	0,01072	15,495	19204
7	70	1160	77,5	11,422	0,01290	14,968	23113
8	80	1511	99,7	12,956	0,01463	15,155	26215
9	90	1898	125,2	14,518	0,01640	15,160	29377
10	100	2367	153,6	16,081	0,01816	15,410	32539

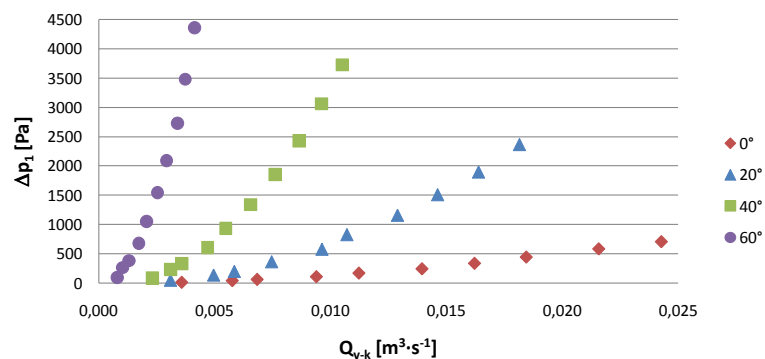
5.3 Plastový kohout (přivřen na 40°)

Měření č.	Naměřené hodnoty			Vypočtené hodnoty			
	f [Hz]	Δp_1 [Pa]	Δp_2 [Pa]	$v_{s,k}$ [m·s ⁻¹]	$Q_{v,k}$ [m ³ ·s ⁻¹]	ξ [-]	Re [-]
1	15	84	2,5	2,052	0,00232	33,600	4151
2	25	232	4,5	2,752	0,00311	51,556	5569
3	30	331	6,0	3,178	0,00359	55,167	6431
4	40	603	10,3	4,164	0,00470	58,544	8426
5	50	931	14,0	4,855	0,00548	66,500	9824
6	60	1339	20,0	5,803	0,00655	66,950	11742
7	70	1851	27,0	6,742	0,00762	68,556	13642
8	80	2428	34,8	7,654	0,00865	69,770	15488
9	90	3061	43,0	8,508	0,00961	71,186	17216
10	100	3726	51,5	9,311	0,01052	72,350	18841

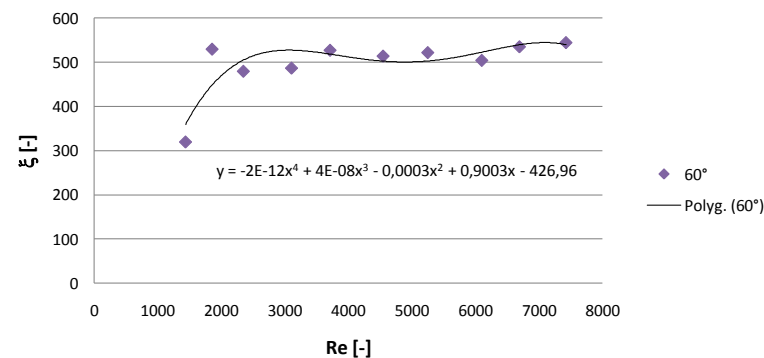
5.4 Plastový kohout (přivřen na 60°)

Měření č.	Naměřené hodnoty			Vypočtené hodnoty			
	f [Hz]	Δp_1 [Pa]	Δp_2 [Pa]	$v_{s,k}$ [m·s ⁻¹]	$Q_{v,k}$ [m ³ ·s ⁻¹]	ξ [-]	Re [-]
1	15	96	0,3	0,711	0,00080	320,000	1438
2	25	265	0,5	0,917	0,00104	530,000	1856
3	30	384	0,8	1,161	0,00131	480,000	2348
4	40	682	1,4	1,535	0,00173	487,143	3107
5	50	1055	2,0	1,835	0,00207	527,500	3713
6	60	1543	3,0	2,247	0,00254	514,333	4547
7	70	2089	4,0	2,595	0,00293	522,250	5251
8	80	2725	5,4	3,015	0,00341	504,630	6101
9	90	3480	6,5	3,308	0,00374	535,385	6694
10	100	4359	8,0	3,670	0,00415	544,875	7426

Porovnání závislostí $Q_{v,k} - \Delta p_1$ (pro polohy 0° - 60°)



Závislost Re - ξ (přivřeno na 60°)



Příloha F

Kovový ventil - měření kolenovým průtokoměrem

6.1 Kovový ventil (plně otevřen)

Měření č.	Naměřené hodnoty			Vypočtené hodnoty			
	f [Hz]	Δp_1 [Pa]	Δp_2 [Pa]	$v_{s,k}$ [m·s ⁻¹]	Q_{v-k} [m ³ ·s ⁻¹]	ξ [-]	Re [-]
1	15	73	0,8	1,161	0,00131	91,250	2348
2	25	213	1,7	1,692	0,00191	125,294	3423
3	30	309	2,5	2,052	0,00232	123,600	4151
4	40	548	4,0	2,595	0,00293	137,000	5251
5	50	865	5,8	3,125	0,00353	149,138	6323
6	60	1258	8,5	3,783	0,00427	148,000	7655
7	70	1716	10,5	4,204	0,00475	163,429	8508
8	80	2260	14,0	4,855	0,00548	161,429	9824
9	90	2863	17,7	5,459	0,00617	161,751	11046
10	100	3459	19,5	5,730	0,00647	177,385	11594

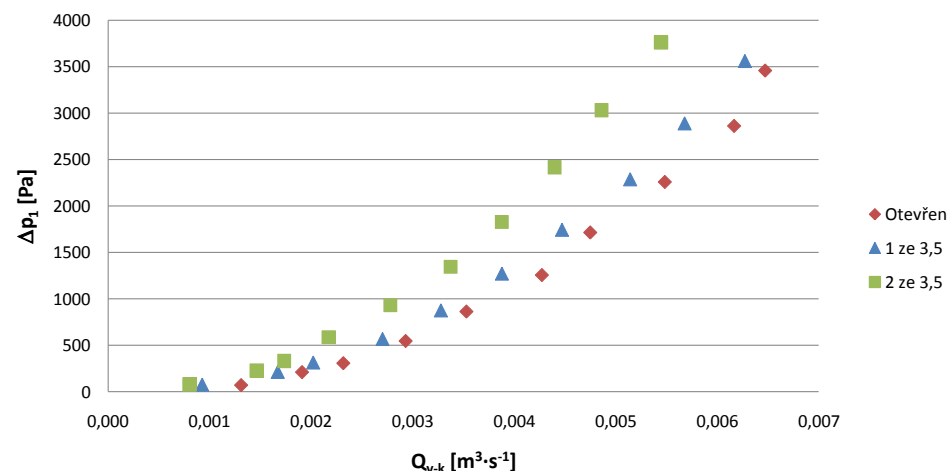
6.2 Kovový ventil (přivřen na 1 ze 3,5 otáček)

Měření č.	Naměřené hodnoty			Vypočtené hodnoty			
	f [Hz]	Δp_1 [Pa]	Δp_2 [Pa]	$v_{s,k}$ [m·s ⁻¹]	Q_{v-k} [m ³ ·s ⁻¹]	ξ [-]	Re [-]
1	15	77	0,4	0,821	0,00093	192,500	1661
2	25	214	1,3	1,479	0,00167	164,615	2994
3	30	315	1,9	1,788	0,00202	165,789	3619
4	40	568	3,4	2,392	0,00270	167,059	4841
5	50	876	5,0	2,901	0,00328	175,200	5871
6	60	1272	7,0	3,433	0,00388	181,714	6946
7	70	1744	9,3	3,957	0,00447	187,527	8007
8	80	2287	12,3	4,551	0,00514	185,935	9208
9	90	2889	15,0	5,025	0,00568	192,600	10168
10	100	3561	18,3	5,551	0,00627	194,590	11231

6.3 Kovový ventil (přivřen na 2 ze 3,5 otáček)

Měření č.	Naměřené hodnoty			Vypočtené hodnoty			
	f [Hz]	Δp_1 [Pa]	Δp_2 [Pa]	$v_{s,k}$ [m·s ⁻¹]	Q_{v-k} [m ³ ·s ⁻¹]	ξ [-]	Re [-]
1	15	79	0,3	0,711	0,00080	263,333	1438
2	25	229	1,0	1,297	0,00147	229,000	2625
3	30	333	1,4	1,535	0,00173	237,857	3107
4	40	589	2,2	1,925	0,00217	267,727	3894
5	50	932	3,6	2,462	0,00278	258,889	4982
6	60	1346	5,3	2,987	0,00337	253,962	6044
7	70	1828	7,0	3,433	0,00388	261,143	6946
8	80	2415	9,0	3,892	0,00440	268,333	7876
9	90	3030	11,0	4,303	0,00486	275,455	8708
10	100	3761	13,8	4,820	0,00544	272,536	9753

Porovnání závislostí Q_{v-k} - Δp_1 (všechny polohy)



Porovnání závislostí Re - ξ (všechny polohy)

